



IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re Patent Application of)	
Michael STEIGERWALD et al.)	Group Art Unit: 2881
Application No.: 10/825,240)	Examiner:
Filed: April 16, 2004)	Confirmation No.: 7784
For: ELECTRON MICROSCOPY SYSTEM,)	
ELECTRON MICROSCOPY METHOD)	
AND FOCUSING SYSTEM FOR)	
CHARGED PARTICLES)	

SUBMISSION OF CERTIFIED COPY OF PRIORITY DOCUMENT

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

The benefit of the filing date of the following priority foreign application in the following foreign country is hereby requested, and the right of priority provided in 35 U.S.C. § 119 is hereby claimed.

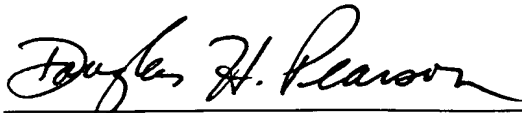
Country:	Germany
Patent Application No.:	DE 103 17 894.5
Filed:	April 17, 2003

In support of this claim, enclosed is a certified copy of said foreign application. Said prior foreign application referred to in the oath or declaration and/or the Application Data Sheet. Acknowledgement of receipt of this certified copy is requested.

Respectfully submitted,

BURNS, DOANE, SWECKER & MATHIS, L.L.P.

Date: August 30, 2004

By: 
Douglas H. Pearson
Registration No. 47,851

P.O. Box 1404
Alexandria, Virginia 22313-1404
(703) 836-6620

CERTIFIED COPY OF
PRIORITY DOCUMENT



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 103 17 894.5

Anmeldetag: 17. April 2003

Anmelder/Inhaber: LEO Elektronenmikroskopie GmbH,
73447 Oberkochen/DE

Bezeichnung: Fokussiersystem für geladene Teilchen,
Elektronenmikroskopiesystem und
Elektronenmikroskopieverfahren

IPC: H 01 J 37/244

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 26. Februar 2004
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Attorney Docket NO.
007413-076
Serial No: 10/825,240
Filed: April 16, 2004

BEST AVAILABLE COPY

DIEHL · GLAESER HITL & PARTNER

GESELLSCHAFT BÜRGERLICHEN RECHTS

Patentanwälte · Augustenstrasse 46 · D - 80333 München

Dr. Hermann O. Th. Diehl · Diplom-Physiker
Joachim W. Glaeser · Diplom-Ingenieur*
Dr. Elmar Hiltl · Diplom-Chemiker
Dr. Frank Schorr · Diplom-Physiker
Dr. Christian Huber · Diplom-Chemiker
Dr. Klaus Hinkelmann · Diplom-Chemiker
In Kooperation mit Diehl & Partner AG
CH - 7513 Silvaplana · Schweiz

Patentanwälte · European Patent Attorneys
München · Hamburg

17. April 2003
Neue deutsche Patentanmeldung
Z8746-DE FS/OC

Anmelder

LEO Elektronenmikroskopie GmbH
Carl-Zeiss-Straße 56
D-73447 Oberkochen
Deutschland

**Fokussiersystem für geladene Teilchen, Elektronenmikroskopiesystem
und Elektronenmikroskopieverfahren**

Kanzlei · Office: München

U:ANMELDERZEISSANM_DECK.DOC

Telefon · Telephone
(089) 17 86 36-0

Telefax · Facsimile
(089) 1 78 40 33
(089) 1 78 40 34

E-mail/Internet
info@diehl-patent.de
www.diehl-patent.de

Anschrift · Address
Augustenstrasse 46
D - 80333 München

Postanschrift · Mailing address
P.O. Box 34 01 15
D - 80098 München

5

**Fokussiersystem für geladene Teilchen,
Elektronenmikroskopiesystem und
Elektronenmikroskopieverfahren**

10

Die Erfindung betrifft ein Fokussiersystem für geladene Teilchen, ein Elektronenmikroskopiesystem und ein Elektronenmikroskopieverfahren.

15

Bei einem herkömmlichen Elektronenmikroskopiesystem und -verfahren wird zunächst ein Primärelektronenstrahl auf eine zu untersuchende Probe gerichtet. Die auf die Probe treffenden Elektronen des Primärelektronenstrahl reagieren mit dieser und führen dazu, dass wiederum Elektronen von der Probe ausgehen. Diese von der Probe ausgehenden Elektronen werden sodann detektiert. Je nach Beschaffenheit der Probe an dem Ort, an dem der Primärelektronenstrahl auf diese trifft, werden, bei gleichbleibender Primärelektronenstrahlintensität, mehr oder weniger Elektronen von der Probe ausgehen. Aus einer Untersuchung der Intensität der von der Probe ausgehenden Elektronen in Abhängigkeit von den Orten, an denen der Primärelektronenstrahl auf die Probe trifft, können Strukturinformationen zu der Probe gewonnen werden bzw. elektronenmikroskopische Abbilder der Probe erstellt werden.

25

30

35

Die von der Probe ausgehenden Elektronen werden hierzu beispielsweise von einem Objektiv des Elektronenmikroskopiesystems zu einem Elektronenstrahl geformt, welcher einem Elektronendetektor ganz oder teilweise zugeführt wird. Im Unterschied zu dem Primärelektronenstrahl wird dieser aus den von der Probe ausgehenden Elektronen geformte Strahl im

Rahmen dieser Anmeldung als Sekundärelektronenstrahl bezeichnet.

Die von der Probe ausgehenden Elektronen werden aufgrund unterschiedlicher physikalischer Effekte durch die Elektronen des Primärelektronenstrahls erzeugt. Diese Effekte umfassen insbesondere:

- Die Erzeugung von Rückstreuelektronen ("Back Scattering Electrons"), welche nach einer gängigen Definition eine Energie von mehr als 50 eV aufweisen und auch mit der Abkürzung BSE bezeichnet werden;
- Die Erzeugung von Elektronen, welche nach der gängigen Definition eine Energie von weniger als 50 eV aufweisen und als Sekundärelektronen im engeren Sinne ("Secondary Electrons") bezeichnet werden. Bei diesen unterscheidet man wiederum zwischen mit der Abkürzung SE1 bezeichneten Sekundärelektronen, welche durch ein einfallendes Primärelektron oberflächennah in der Probe erzeugt werden, und mit der Abkürzung SE2 bezeichneten Sekundärelektronen, welche beispielsweise durch aus der Probe austretende Rückstreuelektronen oberflächennah in der Probe erzeugt werden; und
- Die Erzeugung von Elektronen des Primärelektronenstrahls, welche die Oberfläche der Probe nicht ganz erreichen sondern kurz vor der Oberfläche der Probe aufgrund einer Aufladung der Probe reflektiert werden und üblicherweise als Spiegelelektronen ("Mirror electrons") bezeichnet werden.

Unabhängig von dem Erzeugungsmechanismus der von der Probe ausgehenden Elektronen werden diese im Rahmen der vorliegenden Anmeldung als Sekundärelektronen bezeichnet, so-

fern deren Auftreten kausal mit dem Auftreffen eines oder mehrerer Primärelektronen in Zusammenhang steht.

5 Aus beispielsweise US 4,464,571 ist ein Elektronenmikroskopiesystem bekannt, bei dem die von der Probe ausgehenden Elektronen hinsichtlich ihrer kinetischen Energie untersucht werden, um auf den Erzeugungsmechanismus der von der Probe ausgehenden Elektronen rückschließen zu können. Durch die energieselektive Untersuchung von Inten-
10 sitäten von Sekundärelektronen, deren Energien in vorbestimmten Intervallen liegen, lassen sich nämlich zusätzliche Strukturinformationen über die untersuchte Probe gewinnen.

15 Vor diesem Hintergrund ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Elektronenmikroskopiesystem und ein Elektronenmikroskopieverfahren vorzuschlagen, mit dem es möglich ist, auf eine alternative Weise Strukturinformationen einer zu untersuchenden Probe zu gewinnen.

20 Ferner umfasst ein Elektronenmikroskopiesystem ein Fokussiersystem für die geladenen Teilchen, nämlich die Primärelektronen. Das Fokussiersystem umfasst üblicherweise eine magnetische Fokussierlinse oder eine elektrostatische Fokussierlinse oder eine Kombination aus einer magnetischen und einer elektrostatischen Fokussierlinse, um die geladenen Teilchen in einem möglichst kleinen Fokus zu fokussieren. Die Fokussierlinse weist allerdings typischerweise einen sogenannten "Öffnungsfehler" auf, so dass
25 radial außen die Linse durchsetzende geladene Teilchen im Vergleich zu radial weiter innen die Linse durchsetzenden geladenen Teilchen zu stark abgelenkt werden, so dass die geladenen Teilchen nicht idealerweise in einem Punkt sondern innerhalb einer Scheibe fokussiert werden. Ferner
30 weist eine solche Fokussierlinse auch einen "chromatischen Fehler" auf, der dadurch zustande kommt, dass geladene
35

Teilchen mit einer geringeren kinetischen Energie stärker abgelenkt werden als Teilchen mit einer höheren kinetischen Energie. Bei der Fokussierung geladener Teilchen mit kinetischen Energien aus einem Energieband nicht vernachlässigbarer Breite können die Teilchen demgemäß ebenfalls nicht idealerweise in einem Punkt sondern lediglich innerhalb einer Scheibe fokussiert werden.

In dem Artikel "Computer Design of High Frequency Elektron-Optical Systems" von Laurence C. Oldfield aus "Image Processing and Computer-aided Design" in Electron Optics, P.W. Hawkes, edi, Academic Press, London, Seiten 370-399, wird vorgeschlagen, in eine Fokussierlinse einen Hohlraumresonator zu integrieren, um Fehler der Fokussierlinse zu kompensieren. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass in der Praxis hierdurch eine Kompensierung der Fehler der Fokussierlinse nicht zufriedenstellend möglich ist.

Vor diesem Hintergrund ist es eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Fokussiersystem für geladene Teilchen, insbesondere für ein Elektronenmikroskopiesystem, vorzuschlagen, mit dem eine feinere Fokussierung der geladenen Teilchen möglich ist.

Unter einem ersten Aspekt ist erfindungsgemäß ein Fokussiersystem für geladene Teilchen vorgesehen, welches eine gepulste Quelle zur Bereitstellung eines gepulsten Strahls der geladenen Teilchen und ein Strahlführungssystem zur Führung der geladenen Teilchen des gepulsten Strahls hin zu einer Objektebene umfasst, wobei das Strahlführungssystem eine Fokussierlinsenordnung zur Fokussierung der geladenen Teilchen des gepulsten Strahls in der Objektebene und einen Hohlraumresonator umfasst, welcher in einem Strahlengang des gepulsten Strahls vor der Fokussierlinsenordnung angeordnet ist.

Es überlagern sich damit von der Fokussierlinsenordnung zur Fokussierung der Teilchen bereitgestellte und auf die geladenen Teilchen einwirkende Felder im wesentlichen nicht mit von dem Hohlraumresonator bereitgestellten und auf die geladenen Teilchen einwirkenden Wechselfeldern. Hierdurch ist es möglich, die von dem Hohlraumresonator bereitgestellten Felder unabhängig von den von der Fokussierlinsenordnung bereitgestellten Feldern auszugestalten und damit vor Eintritt der geladenen Teilchen in die Fokussierlinsenordnung einen Phasenraum eines Teilchenpulses derart zu formen bzw. zu beeinflussen, dass ein Fehler der Fokussierlinsenordnung im Hinblick auf eine feine Fokussierung der Teilchen wenigstens teilweise kompensiert wird. Insbesondere kann es eine zwischen der Fokussierlinsenordnung und dem Hohlraumresonator bereitgestellte Driftstrecke, in welcher Felder der Fokussierlinsenordnung und Felder des Hohlraumresonators sich einander im wesentlichen nicht überlagern, ermöglichen, selbst bei vergleichsweise geringer Einwirkung der Felder des Hohlraumresonators auf den Teilchenpuls eine solche Einwirkung während der Drift des Teilchenpulses durch die Driftstrecke derart zu verstärken, dass schließlich eine zufriedenstellende Kompensierung der Fehler der Fokussierlinsenordnung erreicht wird.

Zur Speisung des Hohlraumresonators ist ein Hochfrequenzgenerator vorgesehen, wobei Hohlraumresonator und Hochfrequenzgenerator vorteilhafterweise derart aufeinander abgestimmt sind, dass in einem Inneren des Hohlraumresonators ein elektromagnetisches Wechselfeld erzeugbar ist, welches eine Hauptkomponente seines elektrischen Feldes aufweist, die entlang einer Richtung des Strahlengangs in dem Inneren des Hohlraumresonators orientiert ist. Somit kann der Hohlraumresonator auf die geladenen Teilchen entweder beschleunigend oder verzögernd wirken.

Wirkt der Hohlraumresonator auf die geladenen Teilchen eines Teilchenpulses beschleunigend, so ist eine Phasenbeziehung zwischen der gepulsten Quelle und dem zeitlichen Feldverlauf in dem Hochfrequenzgenerator derart eingestellt, dass eine Stärke der Hauptkomponente des elektrischen Feldes zeitlich abnimmt. Dahinter steht die Überlegung, dass geladene Teilchen mit einer vergleichsweise höheren kinetischen Energie in dem Puls weiter vorne angeordnet sind und damit zeitlich eher in den Hohlraumresonator eintreten und aufgrund der zunehmenden Feldstärke weniger beschleunigt werden als die nachfolgenden geladenen Teilchen mit geringerer kinetischer Energie, welche dann stärker beschleunigt werden. Somit wirkt der Hohlraumresonator dahingehend, eine Energiebreite der geladenen Teilchen des Pulses zu reduzieren, wodurch eine Auswirkung des chromatischen Fehlers der Fokussierlinsenordnung reduziert wird.

Wirkt umgekehrt das Feld des Hohlraumresonators auf die geladenen Teilchen des Pulses verzögernd, so ist vorzugsweise die Phasenbeziehung derart eingestellt, dass die Stärke der Hauptkomponente des elektrischen Feldes bei Eintritt des Pulses zeitlich abnimmt.

Bei auf die geladene Teilchen beschleunigend wirkendem Feld des Hochfrequenzgenerators ist ferner vorzugsweise vorgesehen, dass ausgehend von einem Zentrum des von dem gepulsten Strahl durchsetzten Inneren des Hohlraumresonators eine Stärke des beschleunigend wirkenden Feldes nach radial außen zunimmt. Dahinter steht die Überlegung, dass dann auch radial außen laufende Teilchen des Pulses stärker beschleunigt werden als radial weiter innen laufende Teilchen des Pulses. Die radial weiter außen laufenden Teilchen werden nachfolgend auch radial weiter außen und in die Fokussierlinsenordnung eintreten, wo dann aufgrund ihrer vergleichsweise höheren kinetischen

Energie ein Ablenkwinkel der Fokussierlinsenordnung im Hinblick auf die Fokussierung der Teilchen reduziert ist, wodurch ein Öffnungsfehler der Fokussierlinsenordnung wenigstens teilweise kompensierbar ist.

5

Wirkt umgekehrt der Hohlraumresonator verzögernd auf die geladenen Teilchen, so sind eine Geometrie des Hohlraumresonators und der Hochfrequenzgenerator umgekehrt derart aufeinander abgestimmt, dass die verzögernde Wirkung des Feldes ausgehend von einem Zentrum des von dem gepulsten Strahl durchsetzten Inneren nach radial außen hin abnimmt.

10

Unter einem zweiten Aspekt sieht die Erfindung ein Elektronenmikroskopiesystem vor, welches ein Fokussiersystem der vorangehend geschilderten Art umfasst.

15

Unter einem dritten Aspekt ist erfindungsgemäß ein Elektronenmikroskopiesystem vorgesehen, bei dem die Primärelektronen als wenigstens ein zeitlich kurzer Impuls auf die Probe gerichtet werden und eine Zeitabhängigkeit der von der Probe ausgehenden Elektronen untersucht wird. Der Erfindung liegt hierbei die Überlegung zugrunde, dass den vorangehend geschilderten unterschiedlichen physikalischen Effekten, welche zu den von der Probe ausgehenden Elektronen führen, unterschiedliche Zeiten zugeordnet sind, die zwischen einem Auftreffen eines oder mehrerer Primärelektronen und dem Verlassen der durch diese Primärelektronen hervorgerufenen Sekundärelektronen der Probe liegen. Somit kann aus einer Untersuchung einer Zeitabhängigkeit von Intensitäten der von der Probe ausgehenden Elektronen zusätzliche Strukturinformation über die untersuchte Probe gewonnen werden.

20

30

Unter einem vierten Aspekt sieht die Erfindung ein Elektronenmikroskopiesystem vor, welches einen Hohlraumresonator in seinem Strahlengang aufweist. Es hat sich herausge-

35

stellt, dass die Anordnung eines solchen Hohlraumresonators im Strahlengang des Primärelektronenstrahls oder/und im Strahlengang des Sekundärelektronenstrahls neue Konfigurationen und Betriebsweisen von Elektronenmikroskopiesystemen erschließt. Insbesondere kann der Primärelektronenstrahl oder/und der Sekundärelektronenstrahl durch den in diesem Strahlengang angeordneten Hohlraumresonator sehr schnell beeinflusst werden, was es ermöglicht, völlig neue Betriebsweisen für das Elektronenmikroskopiesystem zu erschließen und damit auch völlig neue Untersuchungsmechanismen für elektronenmikroskopische Proben zu erschließen.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist der Hohlraumresonator in dem Strahlengang des Sekundärelektronenstrahls angeordnet, und ein wenigstens eindimensional ortsauflösender Detektor ist in dem Strahlengang des Sekundärelektronenstrahls hinter dem Hohlraumresonator angeordnet. Hierdurch ist es möglich, zeitabhängige Intensitätsentwicklungen in dem Sekundärelektronenstrahl mit hoher zeitlicher Auflösung zu beobachten.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist der Hohlraumresonator in dem Strahlengang des Primärelektronenstrahls angeordnet, und eine Blende mit einer Blendeneffnung ist in dem Strahlengang des Primärelektronenstrahls hinter dem Hohlraumresonator angeordnet. Hierdurch ist es möglich, einer Intensität des Primärelektronenstrahls ein zeitabhängiges Intensitätsmuster mit hoher Zeitauflösung aufzuprägen, insbesondere den Primärelektronenstrahl sehr schnell an- und auszuschalten und weiter insbesondere besonders kurze Primärelektronenstrahlpulse zu formen.

Der Hohlraumresonator ist vorzugsweise von einem Hochfrequenzgenerator derart gespeist, dass in einem Inneren des Hohlraumresonators, welches von dem Strahlengang durch-

5 setzt ist, ein elektromagnetisches Wechselfeld erzeugbar ist, welches eine Hauptkomponente seines magnetischen Feldes aufweist, die transversal zu einer Richtung des Strahlengangs in dem Inneren des Hohlraumresonators orientiert ist.

10 Unter dem vorangehend genannten dritten Aspekt weist das Elektronenmikroskopiesystem zur Untersuchung einer in einer Objektebene des Elektronenmikroskopiesystems anordenbaren Probe vorzugsweise auf: eine gepulste Elektronenstrahl-
 15 quelle, ein Elektronenmikroskopieobjektiv, welches dazu ausgebildet ist, einen von der Elektronenstrahlquelle erzeugten gepulsten Primärelektronenstrahl auf die Probe zu richten und von der Probe ausgehende Elektronen zu einem Sekundärelektronenstrahl zu formen, und ein Elektronen-
 20 detektionssystem zur Detektion von Elektronen des Sekundärelektronenstrahls, wobei das Elektronendetektionssystem ein zeitauflösendes Elektronendetektionssystem ist.

25 Hiermit ist es möglich, nach dem Einstrahlen eines kurzen Primärelektronenstrahlpulses auf die Probe eine Zeitabhängigkeit der von der Probe ausgehenden Elektronenintensitäten zu untersuchen und daraus Rückschlüsse auf die Struktur der Probe zu treffen.

30 Vorzugsweise umfasst das Elektronendetektionssystem einen Elektronendetektor und einen Elektronenstrahlverschluss, welcher lediglich während einer einstellbaren oder vorbestimmten Zeitdauer den Sekundärelektronenstrahl zu dem Elektronendetektor durchtreten lässt. Hierdurch ist es möglich, durch den Detektor Sekundärelektronen zu detektieren, welche innerhalb eines der Zeitdauer entsprechenden Zeit-
 35 fensters nach dem Auftreffen des Primärelektronenstrahlpulses aus der Probe austreten bzw. von dieser ausgehen. Der Elektronenstrahlverschluss umfasst vorzugsweise einen Strahlablenker und eine im Strahlengang hinter dem Strahl-

ablenker angeordnete Blende mit einer Blendenöffnung. Der Strahlablenker ist dann derart ansteuerbar, dass er einen Ablenkwinkel für den ihn durchsetzenden Sekundärelektronenstrahl während einer Zeitdauer kontinuierlich ändert, so dass der Strahl die Blende überstreicht und dabei während einer vergleichsweise langen Zeit auf die Blende trifft und lediglich während einer vergleichsweise kurzen Zeit die Blendenöffnung trifft, um die Blende zu durchsetzen. Hierdurch ist es möglich, zeitlich besonders eng definierte Zeitfenster einzustellen.

Vorzugsweise umfasst das Elektronenmikroskopiesystem hierbei ein Steuersystem, welches dazu ausgebildet ist, einen Zeitversatz zwischen der Zeitdauer, während der der Sekundärelektronenstrahl zu dem Elektronendetektor durchtritt, und einer Erzeugungsdauer einzustellen, während der die Elektronenstrahlquelle den Primärelektronenstrahlpuls erzeugt oder/und während der der Primärelektronenstrahlpuls auf die Probe trifft. Hierdurch ist es möglich, das Zeitfenster, während dem Sekundärelektronen detektiert werden, relativ zu dem Auftreffen des Primärelektronenstrahlpulses zu verschieben und somit ein Zeitspektrum der durch den Primärelektronenstrahlpuls hervorgerufenen Sekundärelektronen aufzunehmen.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform umfasst das Elektronendetektionssystem einen Strahlablenker und einen in einem Strahlengang des Sekundärelektronenstrahls hinter dem Strahlablenker angeordneten ortsauflösenden Elektronendetektor. Hierbei ist es möglich, den Strahlablenker derart anzusteuern, dass er einen Ablenkwinkel für den Sekundärelektronenstrahl kontinuierlich ändert und damit nacheinander verschiedene Orte auf dem ortsauflösenden Elektronendetektor überstreicht. Elektronenintensitäten, welche von verschiedenen strahlungsempfindlichen Elementen bzw. Pixeln des Detektors registriert werden, repräsen-

tieren dann Elektronenintensitäten, welche zu jeweils verschiedenen Zeiten auf den Elektronendetektor auftreffen.

Hierbei ist es möglich, dass der Strahlablenker den
 5 Sekundärelektronenstrahl in lediglich eine Richtung ablenkt
 und der ortsauflösende Elektronendetektor ein eindimen-
 sional ortsauflösender Detektor bzw. ein Zeilendetektor
 ist, welcher relativ zu dem Strahlablenker derart ange-
 ordnet ist, dass sich bei einer Änderung des Ablenkwinkels
 10 des Strahlablenkers auch der Ort auf dem Zeilendetektor än-
 dert, an welchem der Sekundärelektronenstrahl auf den
 Detektor trifft.

Vorzugsweise ist der ortsauflösende Elektronendetektor ein
 15 zweidimensional ortsauflösender Detektor, und der Strahl-
 ablenker ist dazu ausgebildet, den Sekundärelektronenstrahl
 in zwei Richtungen abzulenken, welche quer zueinander
 orientiert sind. Hierdurch ist es möglich, dass die Auf-
 trefforte des Sekundärelektronenstrahls auf dem Detektor
 20 auf einer ringförmigen Bahn liegen, welche eine ringförmig
 geschlossene Bahn oder eine Bahn, die einen Teil eines
 Rings umfasst, sein kann. Hierdurch ist es möglich, dass
 der Strahl den Detektor mit einer gleichförmigen Ge-
 schwindigkeit überstreicht und somit eine erzielbare Zeit-
 25 auflösung des Elektronendetektionssystems unabhängig von
 dem Ablenkwinkel des Strahlablenkers ist.

Vorzugsweise ist in dem Strahlengang des Sekundärelek-
 tronenstrahls ein Energiefilter vorgesehen, um eine vorbe-
 30 stimmte oder einstellbare kinetische Energie der Sekundär-
 elektronen, welche den Energiefilter passieren können, ein-
 zustellen. Hierdurch ist es möglich, die zeitaufgelöste Un-
 tersuchung auf bestimmte Energien der von der Probe ausge-
 henden Elektronen zu beschränken. So können beispielsweise
 35 sogenannte Rückstreuelektronen, BSE, welche zeitgleich mit
 den Sekundärelektronen SE1 aus der Probe austreten, ausge-

blendet werden, um die Untersuchung lediglich auf die Sekundärelektronen SE1 zu beschränken.

Vorzugsweise ist ferner eine Strahlweiche vorgesehen, um Strahlengänge des Primärelektronenstrahls und des Sekundärelektronenstrahls zwischen Strahlweiche und Objektenebene in Überlagerung zu bringen, so dass die Strahlengänge zwischen der Elektronenstrahlquelle und der Strahlweiche einerseits und der Strahlweiche und dem Elektronendetektor andererseits voneinander separiert sind. Hierbei stellt vorzugsweise eine Komponente eines in einem Strahlengang des Sekundärelektronenstrahls oder des Primärelektronenstrahls vorgesehenen Energiefilters die Strahlweiche bereit.

Die Strahlweiche bzw. der Energiefilter kann derart ausgebildet sein, dass der Sekundärelektronenstrahl nach Durchlaufen des Energiefilters in Abhängigkeit von der Energie in verschiedene Winkelrichtungen verläuft. Damit ist der Sekundärelektronenstrahl in einer Strahlebene in unterschiedliche Winkel aufgefächert. Der Strahlablenker lenkt dann vorzugsweise die Sekundärelektronen in eine Richtung quer zu dieser Strahlebene auf den Detektor ab. Wenn dieser hiermit, wie bevorzugt, als zweidimensional ortsauflösender Detektor ausgebildet ist, ist es möglich, die Sekundärelektronen sowohl hinsichtlich ihrer Energie als auch ihres zeitlichen Auftretens zu untersuchen.

Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist es vorgesehen, dass die gepulste Elektronenstrahlquelle einen Strahlablenker und eine in dem Strahlengang hinter dem Strahlablenker angeordnete Blende mit einer Blendenöffnung aufweist. Es ist dann möglich, einen Ablenkwinkel des Strahlablenkers kontinuierlich zu ändern, so dass der Strahl während einer vergleichsweise großen Zeit auf die Blende trifft und von dieser absorbiert wird und lediglich

während einer vergleichsweise kurzen Zeit die Blendenöffnung trifft, um die Blende zu durchsetzen. Hierdurch ist es möglich, Primärelektronenstrahlpulse besonders kurzer Dauer zu erzeugen.

5

Alternativ hierzu ist es jedoch auch möglich, die gepulste Elektronenstrahlquelle derart zu realisieren, dass sie eine gepulste Photonenquelle umfasst, deren emittierter gepulster Photonenstrahl auf einen Elektronenemissionskörper der Quelle trifft. Der Elektronenemissionskörper kann geheizt oder/und gegenüber einer Blende negativ vorgespannt sein derart, dass, wenn keine Photonen auf den Elektronenemissionskörper treffen, diese, abgesehen von einem Dunkelstrom, im Wesentlichen keine Elektronen emittiert, und dann, wenn Photonen der Photonenquelle auf ihn treffen, Elektronen emittiert. Damit folgt ein Zeitmuster, mit dem Elektronen von dem Elektronenemissionskörper emittiert werden, einem Zeitmuster, mit dem die Photonenquelle angesteuert wird. Die Photonenquelle, beispielsweise ein Halbleiterlaser oder eine LED, kann elektronisch mit einer hohen Zeitauflösung angesteuert werden, so dass es bei dieser Anordnung möglich ist, ebenfalls Elektronenstrahlpulse mit einer wohldefinierten Struktur und insbesondere einer kurzen Pulsdauer zu erzeugen.

10

15

20

25

30

35

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform ist es vorgesehen, dass die gepulste Elektronenstrahlquelle und das Elektronendetektionssystem gemeinsame Komponenten aufweisen. So kann beispielsweise ein Strahlablenker sowohl dazu dienen, den Primärelektronenstrahl bezüglich einer Blendenöffnung so abzulenken, dass er diese lediglich kurzzeitig durchsetzt, als auch dazu dienen, den Sekundärelektronenstrahl derart abzulenken, dass er zeitabhängig auf verschiedene Orte auf einen ortsauflösenden Detektor trifft.

Eine Zeitauflösung des Elektronendetektionssystems ist vorzugsweise besser als 100 ps, vorzugsweise besser als 50 ps und weiter bevorzugt besser als 10 ps.

5 Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend anhand von Zeichnungen näher erläutert. Hierbei zeigt

Figur 1 eine schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Elektronenmikroskopiesystems,

Figur 2 Graphen zur Erläuterung von Zeitstrukturen von Elektronenstrahlpulsen,

Figur 3 eine Darstellung zur Erläuterung von Prozessen, welche von einer Probe ausgehende Elektronen hervorrufen,

Figur 4 eine schematische Darstellung einer gepulsten Elektronenstrahlquelle, wie sie in einem Elektronenmikroskopiesystem gemäß Figur 1 ebenfalls einsetzbar ist,

Figur 5 eine schematische Darstellung einer zweiten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Elektronenmikroskopiesystems,

Figur 6 eine perspektivische schematische Darstellung eines Elektronendetektionssystems, wie es in dem Elektronenmikroskopiesystem gemäß Figur 5 ebenfalls einsetzbar ist,

Figur 7 eine schematische Darstellung einer dritten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Elektronenmikroskopiesystems,

Figur 8 eine schematische Darstellung einer vierten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Elektronenmikroskopiesystems,

5 Figur 9 eine schematische Darstellung einer fünften Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Elektronenmikroskopiesystems,

Figur 10a,

10 Figur 10b Darstellungen zur Erläuterung von Fehlern einer Fokussierlinse,

Figur 11 eine schematische Darstellung einer ersten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Fokussiersystems,

Figur 12 eine Radialabhängigkeit eines Feldes in einem Hohlraumresonator des in Figur 11 gezeigten Fokussiersystems,

20 Figur 13 eine Zeitabhängigkeit des Feldes in dem Hohlraumresonator des in Figur 11 gezeigten Fokussiersystems, und

25 Figur 14 ein Elektronenmikroskopiesystem mit einem erfindungsgemäßen Fokussiersystem.

Ein in Figur 1 schematisch dargestelltes Elektronenmikroskopiesystem 1 umfasst eine Elektronenstrahlquelle 3 zur Erzeugung eines Primärelektronenstrahls 5 und ein Objektiv 7, um den Primärelektronenstrahl 5 auf eine in einer Objektebene 9 des Objektivs 7 angeordnete Oberfläche einer zu untersuchenden Probe 11 zu fokussieren. Der auf die Probenoberfläche 9 fokussierte Primärelektronenstrahl 5 erzeugt sekundäre Elektronen 12, welche von der Probenober-

fläche 9 ausgehen. Ein Teil der sekundären Elektronen 12 tritt in das Objektiv 7 ein und wird von diesem zu einem Sekundärelektronenstrahl 15 geformt, welcher schließlich auf einen Elektronendetektor 17 eines Elektronendetektions-

5 systems 16 gelangt.

Das Objektiv 7 umfasst eine magnetische Fokussierlinse mit einem von Polschuhen 21 umgebenden Spulenkörper 19 sowie einem Paar von in Strahlrichtung hintereinander angeordneten Elektroden 23 und 25. Zwischen diesen ist eine Spannung angelegt, so dass ein elektrisches Feld zwischen den Elektroden 23 und 25 entsteht, welches die Elektronen des Primärelektronenstrahls 5 vor ihrem Auftreffen auf die Probenoberfläche 9 verzögert und die sekundären Elektronen 12 bei ihrem Eintreten in das Objektiv 7 beschleunigt. In einer Bohrung des Objektivs sind ferner Ablenkspulen 27 vorgesehen, welche den Primärelektronenstrahl 5 auslenken, so dass dieser auf auswählbare Orte der Probenoberfläche 9 trifft. Durch Ansteuern der Ablenkspulen 27 ist es somit

10 15 20

möglich, die Probenoberfläche 9 abzutasten und mit dem Detektor 17 Intensitäten von von der Probe ausgehenden Elektronen 12 in Abhängigkeit von dem Ort auf der Probenoberfläche 9 zu detektieren.

Zwischen der Elektronenquelle 3 und dem Objektiv 7 ist eine Strahlweiche 29 angeordnet, welche zwischen Polschuhen ein magnetisches Ablenkkfeld für den Primärelektronenstrahl 5 und den Sekundärelektronenstrahl 15 bereitstellt. Durch die Strahlweiche 29 werden Strahlengänge des Primärelektronenstrahls 5 und des Sekundärelektronenstrahls 15 zwischen der Strahlweiche 29 und der Objektoberfläche 9 in Überlagerung gebracht, während die Strahlengänge zwischen der Elektronenstrahlquelle 3 und der Strahlweiche 29 bzw. der Strahlweiche 29 und dem Elektronendetektor 17 voneinander

25 30 35

separiert sind.

Soweit bisher beschrieben, weist das Elektronenmikroskopiesystem 1 einen Aufbau auf, der dem Aufbau eines herkömmlichen Rasterelektronenmikroskops ("Scanning Electron Microscope" SEM) ähnlich ist.

5

Im Unterschied zu dem herkömmlichen SEM ist die Elektronenstrahlquelle 3 allerdings eine gepulste Elektronenstrahlquelle, welche Primärelektronenstrahlpulse einer Pulsdauer von etwa 20 ps periodisch erzeugt.

10

Hierzu umfasst die Elektronenstrahlquelle 3 eine Glühkathode 31 und eine gegenüber der Glühkathode 31 positiv vorgespannte Anode 33. Mit dieser Anordnung wird zunächst ein kontinuierlicher Elektronenstrahl 4 erzeugt, welcher in einen Hohlraumresonator 35 eintritt. Der Hohlraumresonator 35 wird von einem Hochfrequenzverstärker 37 gespeist, welcher eine von einem Hochfrequenzgenerator 39 bereitgestellte Hochfrequenz von etwa 2,5 GHz verstärkt. Der Hochfrequenzverstärker 37 ist ein Halbleiterverstärker, kann allerdings auch als ein Klystron oder Magneton realisiert sein. Der Verstärker 37 stellt für den Betrieb des Hohlraumresonators 35 eine Leistung von etwa 10 W bereit und speist diese in den Resonator derart ein, dass darin ein elektromagnetisches Wechselfeld angeregt wird, welches in einer TM_{110} -Mode schwingt.

15

20

25

Durch das alternierende elektromagnetische Feld erfährt der in dem Hohlraumresonator 5 eintretende kontinuierliche Elektronenstrahl 4 alternierende Ablenkungen um Winkel α in der Zeichenebene der Figur 1. Im Strahlengang hinter dem Hohlraumresonator 5 ist eine Blende 41 mit einer kleinen kreisförmigen Blendenöffnung 43 angeordnet. Der alternierend abgelenkte kontinuierliche Elektronenstrahl 4 trifft bei Ablenk winkeln, die größer als ein kleiner Schwellenwert sind, auf die Blende 41 und wird von dieser absorbiert. Bei Ablenk winkeln, die kleiner sind als der

30

35

kleine Schwellenwert, trifft der kontinuierliche Strahl 4 in die Blendenöffnung 43 und kann damit die Blende 41 durchsetzen. Auf diese Weise entsteht hinter der Blende 41 der gepulste Primärelektronenstrahl 5, dessen Strahlpulse eine Dauer von etwa 20 ps aufweisen, wobei die einzelnen Pulse mit einer Frequenz von 5 GHz erzeugt werden. Ein zeitlicher Verlauf einer Elektronenintensität in einem solchen Primärelektronenstrahlpuls ist in Figur 2 oben dargestellt.

In Figur 3 sind Prozesse erläutert, welche zu von der Probe 11 ausgehenden sekundären Elektronen führen. Der Primärelektronenstrahl 5 ist durch das Objektiv 7 auf einen Ort 47 auf der Probenoberfläche 9 gerichtet. Ein Auftreffen des Primärelektronen kann unmittelbar an dem Auftreffort 47 aus der Probenoberfläche 9 ein oder mehrere Sekundärelektronen SE1 auslösen. Ferner kann das Primärelektron in die Probe 11 eindringen, wobei es ein oder mehrere Male gestreut wird, wie dies durch eine Trajektorie 49 in Figur 3 angedeutet ist. Die Linie 51 deutet eine sogenannte Streubirne an, mit welcher ein Volumen der Probe 11 um den Auftreffort 47 bezeichnet wird, das von eindringenden Primärelektronen einer gegebenen kinetischen Energie abgetastet werden kann. In einigen Fällen wird das Primärelektron schließlich derart umgelenkt, dass es die Probe als Rückstreuelektron BSE verlässt. Hierbei kann es noch weitere Sekundärelektronen SE2 aus der Probe auslösen. Da das Primärelektron vor seinem Austritt als Rückstreuelektron BSE die Trajektorie 49 durchlaufen muss, gehen das Rückstreuelektron BSE und die Sekundärelektronen SE2 später von der Probe aus als die Sekundärelektronen SE1.

Eine Zeitabhängigkeit der von dem Primärelektronenpuls 46 hervorgerufenen von der Probe 9 ausgehenden Elektronen ist in Figur 2 unten dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass eine Intensitätsverteilung 51 der von der Probe ausgehenden

Elektronen wesentlich breiter ist als der Primärelektronenpuls 46. Zu Beginn des Pulses 51 ist dessen Intensität im Wesentlichen durch Sekundärelektronen SE1 bereitgestellt, zu dessen Ende ist dessen Intensität im Wesentlichen durch Sekundärelektronen SE2 bereitgestellt. Rückstreuielektronen BSE treten je nach Eindringtiefe über die gesamte Pulsdauer aus.

Um die Zeitabhängigkeit des Pulses der sekundären Elektronen aufzulösen, umfasst das Elektronendetektionssystem 16 neben dem eigentlichen Elektronendetektor 17 noch einen weiteren Hohlraumresonator 53 im Strahlengang des Sekundärelektronenstrahls 15, welcher zwischen der Weiche 29 und dem Detektor 17 angeordnet ist. Zwischen dem Hohlraumresonator 53 und dem Detektor 17 ist ferner noch eine Blende 55 mit einer Blendenöffnung 57 angeordnet. Der Hohlraumresonator 53 wird von einem Hochfrequenzverstärker 59 gespeist, welcher ebenfalls die von dem Hochfrequenzgenerator 39 bereitgestellte Hochfrequenz verstärkt, wobei allerdings zwischen dem Hochfrequenzgenerator 39 und dem Hochfrequenzverstärker 59 ein Phasenschieber 61 geschaltet ist. Der Phasenschieber 61 wird von einer Steuerung 63 derart kontrolliert, dass die Steuerung 63 einen Phasenwinkel ϕ zwischen den von den Verstärkern 37 und 59 verstärkten Hochfrequenzen einstellen kann.

Ähnlich wie dies für den Hochfrequenzgenerator 35 und dessen zugehöriger Blende 41 im Strahlengang des Primärelektronenstrahls 5 bereits erläutert wurde, ändert der Hohlraumresonator 53 periodisch einen Ablenkwinkel β des den Resonator 53 durchsetzenden Sekundärelektronenstrahls in der Zeichenebene der Figur 1, so dass nur während eines lediglich kurzen Zeitfensters der Sekundärelektronenstrahl 15 durch die Blendenöffnung 57 auf den Detektor 17 gelangt. Ein solches Zeitfenster δt ist, bei einer gegebenen Phasenverschiebung ϕ in Figur 2 unten eingetragen. Die Breite

dieses Zeitfensters δt beträgt etwa 20 ps und bestimmt damit eine Zeitauflösung des Elektronendetektionssystems 16.

Die Steuerung 63 liest bei einer gegebenen Einstellung des Phasenwinkels ϕ und damit des Zeitfensters δt von dem Elektronendetektor 17 eine detektierte Elektronenintensität aus und speichert diese. Sodann ändert die Steuerung 63 den Winkel ϕ und verschiebt damit das Zeitfenster δt entlang der Zeitachse, um bei dieser geänderten Einstellung ebenfalls wieder die Sekundärelektronenintensität pro Zeiteinheit zu detektieren. Durch wiederholtes Ändern des Phasenwinkels ϕ und Auslesen des Detektors 17 nimmt die Steuerung 63 den Sekundärelektronenpuls 51 in Abhängigkeit von dem Phasenwinkel auf und gibt die aufgenommenen Daten aus, beispielsweise in Form des in Figur 1 eingetragenen Diagramms 65 oder in jeder anderen möglichen Informationsform. Bei gegebener Frequenz des Hochfrequenzgenerators 39 ist das Diagramm 65 umrechenbar in das Zeitdiagramm, wie es in Figur 2 unten dargestellt ist. Somit ist es mit dem in Figur 1 gezeigten Elektronenmikroskopiesystem 1 möglich, die Zeitabhängigkeit des Sekundärelektronenpulses 51 aufzunehmen, wie er durch den Primärelektronenpuls 46 erzeugt wird.

Dieser Vorgang kann durch Ändern der durch die Ablenkspulen 27 verursachten Ablenkungen für eine Vielzahl von Orten 47 der Probenoberfläche 9 wiederholt werden, und aus unterschiedlichen Zeitabhängigkeiten der Sekundärelektronenpulse 51 an den verschiedenen Orten 47 können ortsabhängige Strukturen der Probe 11 untersucht werden.

Die Strahlweiche 29 wirkt gleichzeitig zusammen mit einer Strahlblende 30 mit einer Blendenöffnung 32 als ein Energiefilter 34. Sekundärelektronen einer gegebenen Energie passieren die Blende 33 durch deren Öffnung 32, während höherenergetische Elektronen von der Strahlweiche 29 um einen kleineren Winkel abgelenkt werden und auf die Blende

30 treffen, wie dies in Figur 1 durch einen Strahl 36 angedeutet ist, und niederenergetische Elektronen durch die Strahlweiche 29 um einen größeren Winkel abgelenkt werden und ebenfalls auf die Blende 30 treffen, wie dies durch einen Strahl 38 angedeutet ist.

Nachfolgend werden Varianten der anhand der Figuren 1 bis 3 erläuterten Ausführungsformen beschrieben. Darin sind Komponenten, die Komponenten der Figuren 1 bis 3 hinsichtlich ihrer Funktion oder/und ihres Aufbaus entsprechen, mit den gleichen Bezugsziffern wie in den Figuren 1 bis 3, zur Unterscheidung jedoch mit einem zusätzlichen Buchstaben versehen. Es wird hierbei auf die gesamte vorangehende Beschreibung Bezug genommen.

Bei dem anhand der Figur 1 erläuterten Ausführungsbeispiel ist die gepulste Elektronenstrahlquelle unter Zuhilfenahme eines Hohlraumresonators als Strahlablenker realisiert. In Figur 4 ist eine alternative Ausführungsform einer gepulsten Elektronenstrahlquelle 3a schematisch dargestellt. Diese umfasst einen thermisch geheizten Kathodenkörper 71, welcher an einem V-förmig geformten Heizdraht 72 aufgehängt ist. Der Heizdraht 72 wird zur Erhitzung des Kathodenkörpers 71 von einer Stromquelle 73 gespeist. Mit Abstand von einer Spitze des Kathodenkörpers 71 ist eine Blenden-
elektrode 74 mit einer Blendenöffnung 75 angeordnet. Eine Hochspannungsquelle 76 spannt die Anodenblende 74 gegenüber dem Kathodenkörper 71 vor. Durch eine weitere Hochspannungsquelle 77 ist eine weitere Blendenelektrode 78, welche mit Abstand von der Blendenelektrode 74 angeordnet ist, ebenfalls gegenüber dem Kathodenkörper 71 vorgespannt. Die weitere Blendenelektrode 78 weist eine der Blendenelektrode 74 und dem Kathodenkörper 71 zugewandte parabolförmige Spiegeloberfläche 79 und eine zentrale Blendenöffnung 80 auf.

Eine Photonenquelle 81 mit einer Leuchtdiode 83 und einer Kollimationsoptik 84 ist vorgesehen, um einen im Wesentlichen parallel kollimierten Photonenstrahl 85 zu erzeugen. Die Photonenquelle 81 ist außerhalb eines Vakuummantels 86 eines Elektronenmikroskopiesystems 1a angeordnet, und der Photonenstrahl 85 tritt über ein Fenster 87 des Vakuummantels 86 in den Vakuumraum des Elektronenmikroskopiesystems 1 ein und trifft dort auf den Spiegel 79 mit der parabolischen Oberfläche. Die Blendenelektrode 78 mit der parabolförmigen Spielfläche 79 ist derart relativ zu dem Kathodenkörper 71 angeordnet, dass der Photonenstrahl 85 auf die Spitze des Kathodenkörpers 71 fokussiert ist.

Ist der Photonenstrahl 85 eingeschaltet, so werden von dem Kathodenkörper 71 Elektronen emittiert, wobei zur Überwindung der Austrittsarbeit der Elektronen sowohl eine thermische Anregung der Elektronen in dem Kathodenkörper 71 als auch ein zwischen dem Kathodenkörper 71 und der Anodenblende 74 bereitgestelltes elektrisches Feld als auch ein durch die Photonen des Strahls 85 hervorgerufener Fotoeffekt zusammenwirken. Ist der Photonenstrahl 85 ausgeschaltet, reicht die thermische Anregung der Elektronen des Kathodenkörpers 71 und die Wirkung des elektrischen Feldes zwischen Kathodenkörper 71 und Anodenblende 74 nicht aus, um, abgesehen von einem Dunkelstrom, Elektronen einer wesentlichen Intensität aus dem Kathodenkörper 71 auszulösen.

Durch schnelles An- und Ausschalten des Photonenstrahls 85 ist es somit möglich, einen gepulsten Elektronenstrahl 5a mit der Elektronenstrahlquelle 1a zu erzeugen. Zum An- und Ausschalten der Photonenquelle 81 wird deren Leuchtdiode 83 von einem Hochfrequenzverstärker 37a gespeist, welchem eine von einem Hochfrequenzgenerator 39a erzeugte Hochfrequenz zugeführt wird, wobei zwischen dem Generator 39a und dem Verstärker 37a ein von einer Steuerung 63a des Elektronen-

mikroskopiesystems 1a gesteuerter Phasenschieber 61a zwischengeschaltet ist.

Die anhand der Figur 4 erläuterte gepulste Elektronenstrahlquelle kann bei dem Elektronenmikroskopiesystem 1 die Elektronenstrahlquelle ersetzen.

Hierbei ist zu beachten, dass zur Realisierung der Elektronenstrahlquelle bei der anhand der Figur 1 erläuterten Ausführungsform die Möglichkeiten nicht auf die in den Figuren 1 und 4 gezeigten Quellen beschränkt sind. Es ist vielmehr vorgesehen, jegliche andere mögliche gepulste Elektronenstrahlquelle, welche ausreichend kurze Elektronenpulse bereitstellt, im Rahmen der Erfindung einzusetzen.

Ein in Figur 5 schematisch dargestelltes Elektronenmikroskopiesystem 1b weist einen ähnlichen Aufbau auf, wie das in Figur 1 gezeigte System. So sind insbesondere eine gepulste Elektronenstrahlquelle 3b und ein Objektiv 7b und ein Energiefilter 34b ähnlich aufgebaut, wie die entsprechenden Baugruppen in dem System gemäß Figur 1.

Auch ein Elektronendetektionssystem 16b des Elektronenmikroskopiesystems 1b umfasst einen Hohlraumresonator 53b, welcher von einem Hochfrequenzverstärker 59b gespeist ist, welchem die Hochfrequenz eines Hochfrequenzgenerators 39b über einen Phasenschieber 61b zugeführt wird. Allerdings ist nun ein Elektronendetektor als ein eindimensional ortsauflösender Elektronendetektor bzw. Zeilendetektor 17b ausgebildet, und eine der Blende 55 gemäß Figur 1 entsprechende Blende ist bei dem Elektronendetektionssystem 16b zwischen dem Hohlraumresonator 53b und dem Zeilendetektor 17b nicht vorgesehen. Somit können unabhängig von einem Ablenkwinkel β , welcher von dem Hohlraumresonator 53b für den Sekundärelektronenstrahl 15b in der Zeichenebene der

Figur 5 bereitgestellt ist, die Elektronen des Sekundärelektronenstrahls 15b im Wesentlichen ständig auf den Elektronendetektor 17b treffen. Allerdings ändern sich mit Änderungen des Ablenkwinkels β auch die Auftrefforte der Elektronen auf den Zeilendetektor 17b, so dass die Auftrefforte (x) den Ablenkwinkeln β entsprechen. Diese sind wiederum über die Hochfrequenz zeitabhängig, so dass schließlich die von dem Zeilendetektor 17b ortsabhängig registrierten Elektronenintensitäten eine Zeitabhängigkeit von Sekundärelektronenpulsen 51b repräsentieren. Zur Aufnahme dieser Zeitabhängigkeit der Sekundärelektronenpulse 51b, beispielsweise als Diagramm 65b, muss eine Steuerung 53b, welche dem ortsauflösenden Detektor 17b ausliest, im Unterschied zu der Ausführungsform gemäß Figur 1, nicht unbedingt den durch den Phasenschieber 61b bereitgestellten Phasenwinkel ϕ ändern. Dieser Phasenwinkel ϕ kann beispielsweise vorab fest eingestellt sein. Allerdings ist es gleichwohl vorgesehen, dass die Steuerung 53b den Phasenwinkel ϕ ebenfalls ändert, beispielsweise um einen Messbereich, der bei beschränkten Ablenkwinkeln β oder einer beschränkten Ausdehnung oder Auflösung des Zeilendetektors 17b zugänglich ist, zu erweitern.

Da sich der durch den als Hohlraumresonator 53b ausgeführten Strahlablenker bereitgestellte Ablenkwinkel β sinusförmig in der Zeit ändert, ist, bei einer über die Länge des Zeilendetektors 17b konstanten Ortsauflösung des Detektors 17b die Zeitauflösung des Elektronendetektionssystems 16b von dem Auslenkwinkel β abhängig und insbesondere an den beiden Enden des Zeilendetektors 17b reduziert.

In Figur 6 ist ein Elektronendetektionssystem 16c schematisch perspektivisch dargestellt, welches im Wesentlichen unabhängig von einem Ablenkwinkel β eines Hohlraumresonators 53c eine im Wesentlichen gleiche Zeitauflösung be-

reitstellt. Hierbei ist im Strahlengang eines Sekundärelektronenstrahls 15c hinter dem Hohlraumresonator 53c ein zweidimensional ortsauflösender Elektronendetektor 17c angeordnet. Der Hohlraumresonator 53c wird derart von einem in Figur 6 nicht dargestellten Hochfrequenzverstärker angeregt, dass er in zwei zueinander senkrecht eingespeisten TM_{110} -Moden schwingt. Darin rotieren elektromagnetische Hochfrequenzfelder um eine Symmetrieachse 91 des Hohlraumresonators 53, und der Sekundärelektronenstrahl 15c wird um einen betragsmäßig konstanten Winkel β abgelenkt, dessen Orientierung im Raum allerdings um die Symmetrieachse 91 gleichförmig dreht, so dass der Sekundärelektronenstrahl 15c entlang einer Kreislinie 93 auf den ortsauflösenden Detektor 17c trifft. Der Strahl 14c tastet die Kreislinie 93 mit einer gleichförmigen Geschwindigkeit ab. Entlang der Kreislinie 93 registrierte Elektronenintensitäten repräsentieren damit eine Zeitabhängigkeit eines Sekundärelektronenpulses 51, wie er in Figur 2 dargestellt ist.

Das Elektronendetektionssystem gemäß Figur 6 kann in der Ausführungsform des Elektronenmikroskopiesystems gemäß Figur 5 oder jeder anderen vorangehend beschriebenen oder nachfolgend dargestellten Ausführungsform eingesetzt werden.

Ein in Figur 7 schematisch dargestelltes Elektronenmikroskopiesystem 1d weist einen ähnlichen Aufbau auf wie das in Figur 5 gezeigte System. Ein Elektronendetektionssystem 16d umfasst wiederum einen Hohlraumresonator 53d und einen ortsauflösenden Elektronendetektor. Allerdings sind drei Zeilendetektoren 17d₁, 17d₂ und 17d₃ nebeneinander angeordnet, welche allerdings im Vergleich zu dem in Figur 5 gezeigten Zeilendetektor um 90° um eine Symmetrieachse des Hohlraumresonators 53d verdreht sind, so dass eine Erstreckungsrichtung der Zeilendetektoren 17d₁ bis 17d₃ senk-

recht zur Zeichenebene der Figur 7 orientiert ist. Der Hohlraumresonator 53d wird derart erregt, dass die durch diesen erzeugten Ablenkwinkel β ebenfalls aus der Zeichenebene heraus weisen, so dass zu unterschiedlichen Zeitpunkten auch unterschiedliche Orte entlang der Erstreckungsrichtung der Zeilendetektoren von Elektronen des Sekundärelektronenstrahls 15d bestrahlt werden.

Im Unterschied zu der anhand der Figur 5 erläuterten Ausführungsform weist das Elektronenmikroskopiesystem 1d keinen Energiefilter auf, so dass zwischen einer Strahlweiche 29d und dem Hohlraumresonator 53d keine Blende angeordnet ist, die der Blende 30b der Figur 5 entspricht. Durch die energiedispersive Wirkung des durch die Strahlweiche 29d bereitgestellten Magnetfelds ist der Primärelektronenstrahl 15d in der Zeichenebene der Figur 7 um einen Winkel γ aufgefächert und tritt derart aufgefächert in den Hohlraumresonator 53d ein. Allerdings ändert der Hohlraumresonator 53d die Richtung des eintretenden Sekundärelektronenstrahls 15d in der Zeichenebene der Figur 7 nicht, so dass auf die drei Zeilendetektoren 17d₁ bis 17d₃ Sekundärelektronen aus jeweils unterschiedlichen Energiebändern treffen.

Durch Auslesen der drei Zeilendetektoren gewinnt die Steuerung 63d somit zeitabhängige Intensitätsspektren der Sekundärelektronenpulse, ähnlich wie dies in Figur 2 unten dargestellt ist, allerdings werden diese Spektren für drei verschiedene Energiegruppen gewonnen: Ein Graph 65d in Figur 7 zeigt einen Puls e_1 für eine niedrige Sekundärelektronenenergie, wie er von dem Detektor 17d₁ aufgenommen wird, einen Puls e_2 von Sekundärelektronen mittlerer Energie, wie er von dem Detektor 17d₂ aufgenommen wird, und einen Puls e_3 von Sekundärelektronen hoher Energie, wie er von dem Zeilendetektor 17d₃ aufgenommen wird.

In der anhand der Figur 7 erläuterten Ausführungsform sind drei Zeilendetektoren vorgesehen. Allerdings ist es auch möglich, die Zahl der Zeilendetektoren zu erhöhen oder einen zweidimensional ortsauflösenden Detektor einzusetzen.

Detektierte Elektronenintensitäten in Abhängigkeit von dessen erster Erstreckungsrichtung repräsentieren dann eine Zeitabhängigkeit und in Abhängigkeit von dessen zweiter Erstreckungsrichtung eine Energieabhängigkeit.

Ein in Figur 8 schematisch dargestelltes Elektronenmikroskopiesystem 1e weist einen ähnlichen Aufbau auf, wie das in Figur 5 gezeigte System. Allerdings ist hier eine Strahlweiche zur Separierung von Strahlengängen eines Primärelektronenstrahls und eines Sekundärelektronenstrahls nicht vorgesehen, so dass diese über eine größere Länge zusammenfallen und Komponenten einer Elektronenquelle 3e und Komponenten eines Elektronendetektionssystems 16e entlang der Strahlachsen ineinandergreifen.

Die Elektronenquelle 3e umfasst wiederum eine Kathode 31e, eine Anode 33e, einen Hohlraumresonator 5e und eine Blende 41e. Das Elektronendetektionssystem 16e umfasst wiederum einen Hohlraumresonator 53e und einen ortsauflösenden Detektor 17e.

Die Blende 41e der gepulsten Elektronenquelle 3e ist zwischen dem Hohlraumresonator 53e des Detektionssystems 16e und dessen ortsauflösendem Zeilendetektor 17e angeordnet. Die Blende 41e ist eine Schlitzblende, deren Blendenöffnung sich in der Zeichenebene der Figur 8 (x-Richtung) erstreckt, und der Hohlraumresonator 5e der Quelle 3e lenkt den Primärelektronenstrahl 4e senkrecht zur Zeichenebene (y-Richtung) aus, so dass er die Schlitzöffnung der Blende 51e zentral während lediglich vergleichsweise kurzen Zeitdauern durchsetzt, so dass unterhalb der Blende 41e der gepulste Primärelektronenstrahl 5e entsteht.

Der Hohlraumresonator 53e des Detektionssystems 16e lenkt den Sekundärelektronenstrahl 15e periodisch in der Zeichenebene (x-Richtung) aus, so dass dieser die in x-Richtung sich erstreckende Öffnung der Blende 41e ständig durchsetzt und auf den sich ebenfalls in x-Richtung erstreckenden Zeilendetektor 17e trifft, so dass dieser einen zeitlichen Verlauf von Sekundärelektronenpulsen 51e ortsabhängig registrieren kann.

Die Hohlraumresonatoren 5e und 53e werden durch Hochfrequenzverstärker 37e bzw. 49e gespeist, wobei ein Phasenwinkel ϕ zwischen den Erregungen der Hohlraumresonatoren 5e und 53e durch einen von einer Steuerung 63e angesteuerten Phasenschieber 61e einstellbar ist. Der Phasenwinkel ϕ wird dabei derart eingestellt, dass die Primärelektronenstrahlpulse den Hohlraumresonator 53e jeweils dann durchlaufen, wenn die von diesem bereitgestellten Ablenkkfelder für den Sekundärelektronenstrahl einen Null-Durchgang durchlaufen, so dass der Primärelektronenstrahl von dem Hohlraumresonator 53e im Wesentlichen nicht abgelenkt wird.

Hierbei kann eine Frequenz eines Hochfrequenzgenerators 39e, dessen Hochfrequenz die Verstärker 37e und 59e verstärken, fest eingestellt oder durch die Steuerung 63e änderbar sein. Ist die Hochfrequenz änderbar, so ist es ebenfalls möglich, den ortsauflösenden Detektor 17e durch einen nicht ortsauflösenden Detektor zu ersetzen und die Blende 41e mit ihrer Schlitzöffnung durch eine Blende mit einer Punktöffnung zu ersetzen. Dann ist es möglich, das Spektrum 51e durch Ändern der Frequenz und frequenzabhängiges Aufzeichnen der registrierten Sekundärelektronenintensitäten aufzunehmen.

Der Zeilendetektor 17e weist eine zentrale Ausnehmung für den Durchtritt des Primärelektronenstrahls 4e auf.

Ein in Figur 9 schematisch dargestelltes Elektronenmikroskopiesystem 1f weist einen ähnlichen Aufbau auf, wie das in Figur 8 gezeigte System, indem eine Strahlweiche nicht vorgesehen ist und Komponenten eines Detektionssystems 16f und einer Elektronenstrahlquelle 3f in Strahlrichtung (z-Richtung) ineinandergreifen. Allerdings weisen die Elektronenstrahlquelle 3f und das Detektionssystem 16f als eine gemeinsame Komponente einen Hohlraumresonator 5/53 auf, welcher von dem Primärelektronenstrahl 4f und dem Sekundärelektronenstrahl 15f durchsetzt ist. Auf beide Strahlen 4f, 15f wirkt der Hohlraumresonator 5/53 als Strahlablenker, der die Strahlen in der Zeichenebene der Figur 9 mit zeitlich variierenden Ablenkswinkeln ablenkt. Eine Blende 41f, welche in dem Strahlengang des kontinuierlichen Primärelektronenstrahls 4f hinter dem Hohlraumresonator 5/53 angeordnet ist, formt die Pulse des Primärelektronenstrahls, welche sodann in das Objekt 7f eintreten. Ein in einem Strahlengang des Sekundärelektronenstrahls hinter dem Hohlraumresonator 5/53 angeordneter ortsauflösender und sich in x-Richtung erstreckender Zeilendetektor 17f nimmt wiederum Zeitspektren der Sekundärelektronenpulse auf. Dies ist allerdings nur möglich, wenn die in Figur 9 gezeigte Geometrie des Elektronenmikroskopiesystems bestimmte Voraussetzungen erfüllt, und zwar hinsichtlich Laufdauern der Primärelektronenstrahlpulse zwischen dem Hohlraumresonator 5/53 und der Probenoberfläche 9f sowie der Laufdauern der Sekundärelektronenstrahlpulse zwischen der Probenoberfläche 9f und dem Hohlraumresonator 5/53. Bei einer gegebenen Primärelektronenenergie ist die verlangte Abstimmung der Parameter nur für bestimmte Hochfrequenzen zu erreichen. Deshalb ist die Frequenz eines Hochfrequenzgenerators 39f, mit welcher der Hohlraumresonator 5/53 nach Verstärkung mittels eines Hochfrequenzverstärkers 37/59 gespeist wird, durch eine

Steuerung 53f einstellbar, welche ebenfalls den Detektor 17f ausliest.

Um für verschiedene Primärelektronenenergien verschiedene Spektren f_1 , f_2 und f_3 der Sekundärelektronenpulse aufnehmen zu können, ist die Energie der Primärelektronen durch die Steuerung 63f über eine steuerbare Spannungsquelle 95 einstellbar.

Bei einer jeden der vorangehend erläuterten Ausführungsformen, welche eine Elektronenstrahlquelle mit einem Hohlraumresonator aufweist, ist ebenfalls eine andere gepulste Elektronenstrahlquelle einsetzbar, beispielsweise die anhand der Figur 4 erläuterte Elektronenstrahlquelle.

Ferner ist bei einer jeden der vorangehend erläuterten Ausführungsformen auch die kinetische Energie der Primärelektronen änderbar, sofern dies gewünscht ist.

In den vorangehend beschriebenen Ausführungsbeispielen ist der Hohlraumresonator jeweils lediglich eine Möglichkeit, um zeitlich sich ändernde Ablenkwinkel für die Primär- oder/und Sekundärelektronenstrahlen bereitzustellen. Es kann ebenfalls jegliche andere Art von Strahlablenkern verwendet werden. Allerdings weist die Ausführung der Strahlablenker als Hohlraumresonatoren den Vorteil auf, dass diese Feldenergie speichern bzw. elektrische und magnetische Feldenergie ineinander umwandeln, so dass mit einer vergleichsweise kleinen Leistung der Hochfrequenzverstärker große Feldstärken und damit vergleichsweise große Ablenkwinkel erreichbar sind.

Ferner erlaubt es der Einsatz des Hohlraumresonators, den Elektronenstrahl mit einer hohen Frequenz von einigen GHz zu schalten, so dass Elektronenpulse einer gegebenen Pulsdauer, welche schließlich die Zeitauflösung des Systems be-

stimmt, mit geringem Abstand zeitlich benachbarter Pulse hintereinander folgen können. Somit ist ein Tastgrad bzw. "duty cycle" des gepulsten Strahls wesentlich höher als beim Einsatz herkömmlicher Strahlableiter, welche nicht als Hohlraumresonator sondern beispielsweise als Plattenkondensator oder dergleichen ausgebildet sind.

Figur 10a erläutert einen Öffnungsfehler einer Fokussierlinse für geladene Teilchen, wie beispielsweise des Objektivs 7 der anhand der Figur 1 erläuterten Ausführungsform. Eine Linsenebene der Fokussierlinse ist in Figur 10a mit 81 und eine optische Achse der Fokussierlinse mit 83 und eine Fokusebene der Linse mit 85 bezeichnet. Betrachtet man zwei geladene Teilchen mit jeweils gleicher kinetischer Energie, welche parallel zur optischen Achse 83 in die Linse eintreten, so wird das Teilchen, welches mit einem größeren Abstand a_1 von der optischen Achse 83 in die Linse eintritt, um einen größeren Winkel α_1 durch die Linse abgelenkt als das Teilchen, welches mit dem kleineren Abstand a_2 von der optischen Achse 83 in die Linse eintritt und lediglich um den kleineren Winkel α_2 abgelenkt wird. Allerdings sind die Winkel α_1 und α_2 nicht derart bemessen, dass die Teilchen die optische Achse 83 in der Fokusebene 85 durchsetzen. Vielmehr durchsetzen die Teilchen die optische Achse 83 bereits vor der Fokusebene 85, so dass sie die Fokusebene 85 mit einem Abstand r_s durchsetzen. Für r_s gilt

$$r_s = -\frac{1}{4} C_s \alpha^3, \quad (1)$$

wobei C_s der Koeffizient für den Öffnungsfehler ist. Mit r_s wird auch der Radius des auf den Öffnungsfehler der Linse zurückgehenden Fehlerscheibchens bezeichnet.

Anhand der Figur 10b wird nachfolgend ein chromatischer Fehler der Fokussierlinse erläutert. Ein geladenes Teilchen

mit einer gegebenen kinetischen Energie E tritt mit Abstand von der optischen Achse 83 und parallel zu dieser in die Linse ein und wird um einen Winkel α derart abgelenkt, dass es die optische Achse 83 in der Fokusebene 85 durchsetzt.
 5 Ein auf die gleiche Weise in die Linse eintretendes geladenes Teilchen, welches eine höhere Energie $E + \Delta E$ aufweist, wird durch die Linse um einen kleineren Winkel abgelenkt, so dass es die optische Achse 83 erst hinter der Fokusebene 85 durchsetzt. In der Fokusebene 85 weist das
 10 Teilchen einen Abstand r_c von der optischen Achse 83 auf, für welchen gilt

$$r_c = + C_c \frac{\Delta E}{2 E} \alpha. \quad (2)$$

Hierbei ist C_c der Koeffizient für den chromatischen Fehler der Linse. r_c wird auch als das durch den chromatischen Fehler hervorgerufene Fehlerscheibchen bezeichnet.
 15

Setzt man $r_s + r_c = 0$ so folgt

$$\Delta E = \frac{1}{2} \frac{C_s}{C_c} \cdot E \cdot \alpha^2. \quad (3)$$

Durch Variation der Energie in Abhängigkeit von dem Winkel α ließe sich also der Fehler einer Fokussierlinse reduzieren.
 25

Figur 11 zeigt eine schematische Darstellung eines Fokussiersystems 87, welches eine Fokussierlinse 7g umfasst, deren Fehler bei der Fokussierung geladener Teilchen in einer Fokusebene 85 reduziert sind.
 30

Geladene Teilchen eines gepulsten Teilchenstrahls durchsetzen eine optische Achse 83 der Fokussierlinse 7g vor deren Eintritt in dieselbe in einer Ebene 89. Dies kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass eine Kathode
 35 der Quelle entweder selbst in etwa in der Ebene 89

angeordnet ist oder in dieser Ebene 89 ein Crossover des Teilchenstrahls gebildet ist. Allerdings muß die Bedingung eines solchen Crossovers nicht exakt erfüllt sein. Zwischen der Ebene 89 und der Fokussierlinse 7g ist ein
 5 Hochfrequenzresonator 91 angeordnet, welcher von dem Teilchenstrahl 6g zentral durchsetzt wird, und zwar derart, dass die Teilchen, welche von der Fokussierlinse 7g um einen größeren Winkel α_1 abgelenkt werden, den Resonator 91 mit einem größeren Abstand von der optischen Achse 83
 10 durchsetzen als die Teilchen, welche durch die Linse 7g um einen kleineren Winkel α_2 abgelenkt werden.

Ein Hochfrequenzgenerator 39g speist den Resonator 91 derart mit Hochfrequenzleistung, dass in dem Resonator eine
 15 TM_{010} -Mode angeregt wird. Damit entsteht ein elektromagnetisches Wechselfeld, dessen elektrische Komponente entlang der optischen Achse 83 orientiert ist und die geladenen Teilchen beschleunigt oder verzögert, je nachdem, zu welchem Zeitpunkt diese den Resonatorspalt 93 durch-
 20 setzen.

In Figur 12 ist eine Radialabhängigkeit des elektrischen Feldes zu einem Zeitpunkt t_0 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass ein Betrag der Feldstärke U ausgehend von einem Wert U_0 auf der optischen Achse 83 nach radial außen
 zunächst in etwa quadratisch zunimmt, um weiter außen schließlich wieder abzufallen. Zu dem Zeitpunkt t_0 ist das elektrische Feld derart orientiert, dass es negativ
 30 geladene Teilchen, wie Elektronen, beschleunigt. Es erhalten dann mit größerem Abstand von der optischen Achse 83 den Spalt 93 durchlaufende Elektronen einen größeren Gewinn an kinetischer Energie als Elektronen, welche den Resonator 91 mit einem kleineren Abstand von der optischen Achse 83 durchlaufen. Dies sind aber auch die Elektronen,
 35 welche in die Fokussierlinse 7g mit dem entsprechend größeren Abstand von der optischen Achse 83 eintreten und

von dieser um einen zu großen Winkel α_1 abgelenkt werden (vergleiche Figur 10a), da diese dann allerdings beim Eintritt in Fokussierlinse 7g die vergleichsweise größere kinetische Energie aufweisen, wird der Winkel α_1 etwas reduziert, so dass auch der Fehler r_s reduziert ist. Idealerweise werden die geladenen Teilchen dann unabhängig von ihrem Abstand von der optischen Achse 83 in der Linsenebene 81 um einen solchen Winkel α abgelenkt, dass sie die Fokusebene 85 im wesentlichen auf der optischen Achse 83 durchsetzen.

Bei dem in Figur 11 gezeigten Fokussiersystem 87 kann auch noch ein weiterer Mechanismus zur Reduzierung des Fehlers der Fokussierlinse 7g ausgenutzt werden, was nachfolgend anhand der Figur 13 erläutert wird.

Darin ist ein zeitlicher Verlauf des beschleunigenden bzw. verzögerenden Feldes in dem Spalt 83 des Resonators 91 dargestellt. Es wird angenommen, dass ein vorderes Ende des Teilchenpulses zu einem Zeitpunkt t_1 in den Resonator eintritt und ein hinteres Ende des Teilchenpulses zu einem Zeitpunkt t_2 in den Resonator eintritt. Weisen die geladenen Teilchen in dem Puls eine Verteilung ihrer kinetischen Energie auf, so werden in dem vorderen Teil des Teilchenpulses Teilchen mit einer vergleichsweise höheren kinetischen Energie angeordnet sein, während in einem hinteren Teil des Pulses Teilchen mit einer vergleichsweise niederen kinetischen Energie angeordnet sein werden. Auf die zuerst eintretenden Teilchen, also auf die Teilchen mit der höheren Energie wirkt das Feld verzögernd, während es auf die später eintretenden Teilchen aufgrund der zeitlichen Entwicklung des Feldes beschleunigend wirkt. Entsprechend werden die Unterschiede zwischen den Teilchen des Pulses hinsichtlich ihrer kinetischen Energie durch die Wirkung des Resonators 91 reduziert und damit auch eine Wirkung des

chromatischen Fehlers der Fokussierlinse 7g reduziert (vergleiche Figur 10b).

Die anhand der Figuren 12 und 13 erläuternden Wirkungsmechanismen des Resonators 91 können sich ergänzen, es kann jedoch auch der Wirkungsmechanismus gemäß Figur 12 oder der Wirkungsmechanismus gemäß Figur 13 dominieren.

Die Prinzipien des anhand der Figur 11 erläuterten Fokussiersystems können zur Fokussierung von Strahlen geladener Teilchen jeglicher Art angewendet werden.

In Figur 14 ist ein Beispiel zur Anwendung in einem Elektronenmikroskopiesystem 1g schematisch erläutert. Dieses umfasst eine gepulste Elektronenstrahlquelle 3g und ein Objektiv 7g ähnlich wie dies vorangehend anhand der in Figur 1 dargestellten Ausführungsform bereits erläutert wurde. Ein Fokussiersystem 87 umfasst hierbei zum einen das Objektiv 7g sowie eine weitere Fokussierlinse 95, welche dazu dient, den gepulsten Teilchenstrahl 6g in etwa in einer Ebene 89 auf der optischen Achse zu bündeln. Im Bereich der Ebene 89 ist auch ein scheibenförmiger Detektor 17g für Sekundärelektronen angeordnet, welcher von dem Strahl 6g durch eine zentrale Öffnung durchsetzt wird. Ein Hohlraumresonator 91 zur Kompensierung von Fehlern des Objektivs 7g ist zwischen der Ebene 89 und dem Objektiv 7g angeordnet. Die Wirkung des Hohlraumresonators 91 zur Kompensierung der Fehler des Objektivs 7g wird dadurch erhöht, dass zwischen dem Resonator 91 und dem Objektiv 7g eine Driftstrecke vorgesehen ist, in der sich die Elektronen des Primärelektronenstrahls nach dem Durchsetzen des Hohlraumresonators 91 weiterbewegen und dort Einflüssen des Hohlraumresonators 91 und der Fokussierwirkung des Objektivs 7g im wesentlichen nicht ausgesetzt sind.

Der Hohlraumresonator 5g zur Erzeugung der Pulse des Teilchenstrahls und der Hohlraumresonator 91 zur Kompen-

sierung der Fehler des Objektivs 7g werden aus einer gemeinsamen Hochfrequenzquelle 39g gespeist, haben jedoch separate Hochfrequenzverstärker 37g bzw. 97g. Ein Phasenschieber 99 ist vorgesehen, um eine Phasenbeziehung zwischen der gepulsten Quelle 3g und dem Hohlraumresonator 91 derart einzustellen, dass die Wirkung des Hohlraumresonators 91 im Hinblick auf die Reduzierung der Fehler des Objektivs 7g möglichst optimiert ist.

Selbstverständlich ist es möglich, anstatt der mit einem Hohlraumresonator arbeitenden gepulsten Quelle auch eine andere gepulste Quelle einzusetzen, wie etwa der anhand der Figur 4 erläuterten gepulsten Elektronenquelle.

Das anhand der Figur 14 erläuterte Elektronenmikroskopiesystem entspricht im Hinblick auf die Detektion der Sekundärelektronen mit dem scheibenförmigen Detektor 17g einem herkömmlichen SEM. Es ist jedoch auch möglich, die Reduzierung von Fehlern des Objektivs durch den Hohlraumresonator 91 an anderen Mikroskopiesystemen herbeizuführen, wie etwa den anhand der Figuren 1, 5, 7, 8 oder 9 erläuterten Ausführungsformen, indem bei diesen vor dem Objektiv der fehlerreduzierende Hohlraumresonator in den Strahlengang der Primärelektronen eingefügt wird. Dieser Resonator kann dann ebenfalls von den Sekundärelektronen problemlos durchsetzt werden.

Es ist jedoch auch möglich, den fehlerreduzierenden Hohlraumresonator 91 in den Ausführungsformen gemäß der Figuren 1, 5 oder 7 zwischen Elektronenquelle und Strahlweiche einzufügen.

Zur Detektion von Zeitabhängigkeiten von durch Primärelektronen erzeugten sekundären Elektronen wird zusammenfassend ein Elektronenmikroskopiesystem und ein Elektronenmikroskopieverfahren vorgeschlagen, bei dem Primärelektronenpulse auf eine Probenoberfläche gerichtet werden und von

der Probenoberfläche ausgehende Elektronen zeitaufgelöst detektiert werden. Hierzu umfasst das System insbesondere einen Hohlraumresonator. Ein Hohlraumresonator kann auch dazu eingesetzt werden, Fehler von Fokussierlinsen zu reduzieren.

5

LEO Elektronenmikroskopie GmbH
Z8746-DE FS/HQ

Patentansprüche

5

1. Elektronenmikroskopiesystem zur Untersuchung einer in einer Objektebene (9) des Elektronenmikroskopiesystems (1) anordenbaren Probe (11), umfassend:

10

eine Elektronenstrahlquelle (3) zur Bereitstellung eines Primärelektronenstrahls (6),

15

ein Elektronenmikroskopieobjektiv (7), welches dazu ausgebildet ist, den Primärelektronenstrahl (6) auf die Probe zu fokussieren und von der Probe (11) ausgehende Elektronen zu einem Sekundärelektronenstrahl (15) zu formen,

20

ein Elektronendetektionssystem (16) zur Detektion von Elektronen des Sekundärelektronenstrahls (15), und

25

einen Hohlraumresonator (5,53;91), welcher in einem Strahlengang des Primärelektronenstrahls (6) oder/und des Sekundärelektronenstrahls (15) angeordnet ist, wobei zwischen dem Hohlraumresonator (5,53;91) und dem Elektronenmikroskopieobjektiv (7) eine Driftstrecke vorgesehen ist.

30

2. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 1, ferner umfassend einen den Hohlraumresonator derart speisenden Hochfrequenzgenerator (39), dass in einem von dem Strahlengang durchsetzten Inneren des Hohlraumresonators (5,53) ein elektromagnetisches Wechselfeld erzeugbar ist, welches eine Hauptkomponente seines magnetischen Feldes aufweist, die quer zu einer Richtung des Strahlengangs in dem Inneren des Hohlraumresonators (5,53) orientiert ist.

35

3. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 2, wobei der Hohlraumresonator (53b) in dem Strahlengang des Sekundärelektronenstrahls (15b) angeordnet ist und wobei das Elektronenmikroskopiesystem ferner einen ortsauflösenden Detektor (17b) umfasst, welcher in dem Strahlengang des Sekundärelektronenstrahls hinter dem Hohlraumresonator (53b) angeordnet ist.

4. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 2 oder 3, wobei der Hohlraumresonator (5) in dem Strahlengang des Primärelektronenstrahls (6) vor dem Elektronenmikroskopieobjektiv (7) angeordnet ist und wobei das Elektronenmikroskopiesystem (1) ferner eine Blende (41) mit einer Blendenöffnung (43) umfasst, welche in dem Strahlengang des Primärelektronenstrahls (6) hinter dem Hohlraumresonator (5) angeordnet ist.

5. Elektronenmikroskopiesystem zur Untersuchung einer in einer Objektebene (3) des Elektronenmikroskopiesystems (1) anordenbaren Probe (11), insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 4, umfassend:

eine gepulste Elektronenstrahlquelle (3),

ein Elektronenmikroskopieobjektiv (7), welches dazu ausgebildet ist, einen von der Elektronenstrahlquelle (3) erzeugten gepulsten Primärelektronenstrahl (6) auf die Probe (11) zu richten und von der Probe ausgehende Elektronen zu einem Sekundärelektronenstrahl (15) zu formen, und

ein Elektronendetektionssystem (16) zur Detektion von Elektronen des Sekundärelektronenstrahls (15), wobei das Elektronendetektionssystem (16) ein zeitauflösendes Elektronendetektionssystem ist.

6. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 5, wobei das Elektronendetektionssystem (16) einen Elektronendetektor (17) und einen Elektronenstrahlverschluss (53, 55) umfasst, wobei der Elektronenstrahlverschluss (53, 55) ansteuerbar ist, um den Sekundärelektronenstrahl (15) lediglich während wenigstens einer Zeitdauer zu dem Elektronendetektor (17) durchtreten zu lassen.
7. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 6, wobei der Elektronenstrahlverschluss einen Strahlablenker (53) und eine im Sekundärelektronenstrahlengang hinter dem Strahlablenker (53) angeordnete Blende (55) umfasst.
8. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 6 oder 7, ferner umfassend ein Steuersystem (63), welches dazu ausgebildet ist, einen Zeitversatz (9) zwischen der wenigstens einen Zeitdauer und wenigstens einer Erzeugungsdauer, während der die Elektronenstrahlquelle (3) einen Elektronenstrahlpuls erzeugt, einzustellen.
9. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 5, wobei das Elektronendetektionssystem einen Strahlablenker (53b;53c) und einen in einem Strahlengang hinter dem Strahlablenker (53b;53c) angeordneten ortsauflösenden Elektronendetektor (17b;17c) umfasst.
10. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 9, wobei der Strahlablenker (53c) dazu ausgebildet ist, den Sekundärelektronenstrahl (15c) in zwei quer zueinander orientierte Ablenkrichtungen abzulenken, und wobei der ortsauflösende Elektronendetektor ein zweidimensional ortsauflösender Elektronendetektor (17c) ist.
11. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 9 oder 10, ferner umfassend ein Steuersystem (63b), welches dazu

ausgebildet ist, den Elektronenstrahlablenker derart anzusteuern, dass dieser während wenigstens einer Abtastdauer einen Ablenkwinkel (β) für den Sekundärelektronenstrahl (15b) kontinuierlich ändert, wobei das Steuersystem (63b) ferner dazu ausgebildet ist, einen Zeitverstoß zwischen der wenigstens einen Abtastdauer und wenigstens einer Erzeugungsdauer, während der die gepulste Elektronenstrahlquelle (3b) einen Elektronenstrahlpuls erzeugt, einzustellen.

12. Elektronenmikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 5 bis 11, ferner umfassend einen von dem Sekundärelektronenstrahl (15) durchsetzten Energiefilter (34).
13. Elektronenmikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 5 bis 12, ferner umfassend eine von dem Primärelektronenstrahl (6) und dem Sekundärelektronenstrahl (15) durchsetzte Strahlweiche (29).
14. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 13 in Verbindung mit Anspruch 12, wobei der Energiefilter (34) die Strahlweiche (29) umfasst.
15. Elektronenmikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 13 oder 14, wobei der Sekundärelektronenstrahl (15d) vor seinem Eintritt in die Strahlweiche (29d) eine erste Strahlrichtung aufweist und nach seinem Austritt aus der Strahlweiche (29d) eine zweite Strahlrichtung aufweist, und wobei ein Strahlablenker (53d) des Elektronendetektionssystems (16d) den Sekundärelektronenstrahl (15d) in eine Richtung ablenkt, welche im Wesentlichen orthogonal zu der ersten Strahlrichtung und im Wesentlichen orthogonal zu der zweiten Strahlrichtung orientiert ist.

16. Elektronenmikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 5 bis 15, wobei die gepulste Elektronenstrahlquelle (3) einen Strahlablenker (5) und eine in dem Primärelektronenstrahlengang hinter dem Strahlablenker (5) angeordnete Blende (41) umfasst.
17. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 16, wobei die gepulste Elektronenstrahlquelle (3f) und das Elektronendetektionssystem (16f) einen gemeinsamen Strahlablenker (5/53) aufweisen, der von einem Strahlengang für den Primärelektronenstrahl und einem Strahlengang für den Sekundärelektronenstrahl durchsetzt ist.
18. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 16 oder 17, wobei der Sekundärelektronenstrahl die Blende (41e; 41f) durchsetzt.
19. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 18, wobei die Blende (41e) einen Blendenschlitz aufweist.
20. Elektronenmikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 5 bis 16, wobei die gepulste Elektronenstrahlquelle (3a) einen Elektronenemissionskörper (71) und eine gepulste Photonenquelle (81) zu Emission eines auf den Elektronenemissionskörper gerichteten gepulsten Photonenstrahls (85) umfasst.
21. Elektronenmikroskopiesystem nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der Strahlablenker einen Hohlraumresonator (5,53) umfasst.
22. Elektronenmikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 5 bis 21, wobei das Elektronendetektionssystem (16e) einen von dem Primärelektronenstrahl durchsetzten ersten Strahlablenker (53e) aufweist und die gepulste

Elektronenstrahlquelle (3e) einen zweiten Strahl-
ablenker (5e) aufweist.

23. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 22, wobei,
gesehen in einem durch den Primärelektronenstrahl mit-
geführten Koordinatensystem, Ablenkrichtungen des er-
sten und des zweiten Strahlablenkers quer, insbeson-
dere orthogonal, zueinander orientiert sind.

24. Elektronenmikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 5
bis 23, ferner umfassend ein Steuersystem, welches
dazu ausgebildet ist:

die Elektronenstrahlquelle zur periodischen Emission
von Elektronenstrahlpulsen anzusteuern und

einen Strahlablenker des Elektronendetektionssystems
periodisch anzusteuern, und

eine Phasenlage der periodischen Ansteuerung der
Elektronenstrahlquelle relativ zu der periodischen An-
steuerung des Strahlablenkers zu ändern oder/und eine
Frequenz der periodischen Ansteuerung zu ändern.

25. Elektronenmikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 5
bis 24, wobei eine Zeitauflösung des Elektronendetek-
tionssystems kleiner ist als 100 ps, vorzugsweise
kleiner als 50 ps, und weiter bevorzugt kleiner als
10 ps.

26. Fokussiersystem für geladene Teilchen, umfassend:

eine gepulste Quelle (3g) zur Bereitstellung eines ge-
pulsten Strahls (6g) der geladenen Teilchen und ein
Strahlführungssystem zur Führung der geladenen

Teilchen des gepulsten Strahls hin zu einer Objektebene (9g),

wobei das Strahlführungssystem eine Fokussierlinsen-
anordnung (7g) zur Fokussierung der geladenen Teilchen
des gepulsten Strahls in der Objektebene (9g) und
einen Hohlraumresonator (91) umfasst, welcher in einem
Strahlengang des gepulsten Strahls (6g) vor der
Fokussierlinsenanordnung (7g) angeordnet ist.

27. Fokussiersystem nach Anspruch 26, wobei das Strahl-
führungssystem ferner einen den Hohlraumresonator (91)
derart speisenden Hochfrequenzgenerator (39g) umfasst,
dass in einem von dem gepulsten Strahl (6g)
durchsetzten Inneren des Hohlraumresonators (91) ein
elektromagnetisches Wechselfeld erzeugbar ist, welches
eine Hauptkomponente seines elektrischen Feldes auf-
weist, die entlang einer Richtung des Strahlengangs in
dem Inneren des Hohlraumresonators orientiert ist.

28. Fokussiersystem nach Anspruch 27, ferner umfassend
eine Steuerung (99) zur Einstellung einer Phasen-
beziehung zwischen der gepulsten Quelle (3g) und dem
Hohlraumresonator (91) derart, dass die Haupt-
komponente des elektrischen Feldes bei Eintritt eines
Pulses geladener Teilchen derart orientiert ist, dass
die geladenen Teilchen des Pulses beschleunigt werden,
und dass eine Stärke der Hauptkomponente des
elektrischen Feldes zeitlich zunimmt.

29. Fokussiersystem nach Anspruch 27, ferner umfassend
eine Steuerung (99) zur Einstellung einer Phasen-
beziehung zwischen der gepulsten Quelle (3g) und dem
Hohlraumresonator (91) derart, dass die Haupt-
komponente des elektrischen Feldes bei Eintritt eines
Pulses geladener Teilchen derart orientiert ist, dass

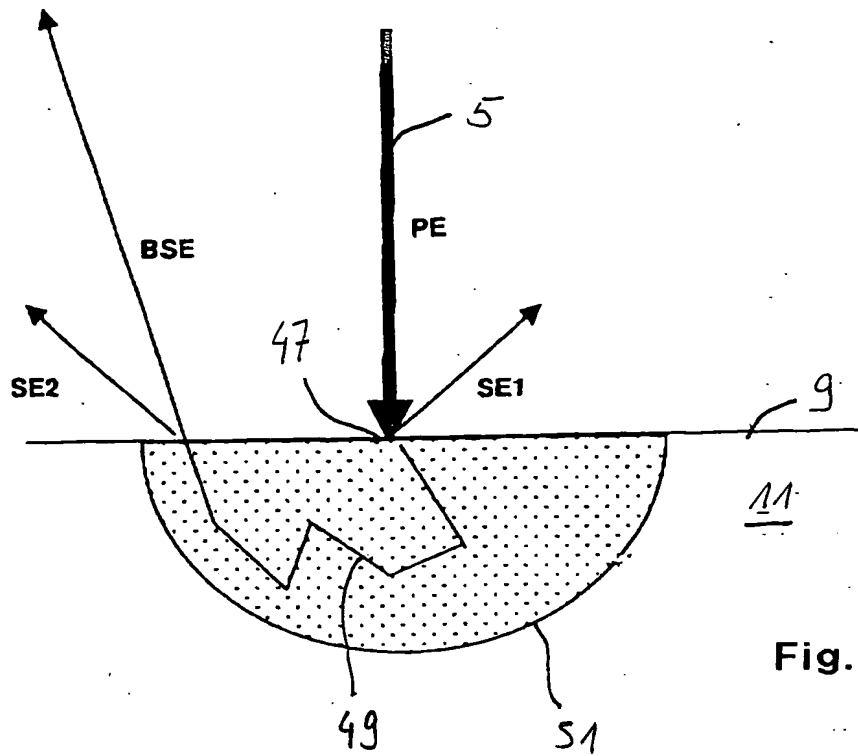


Fig. 3

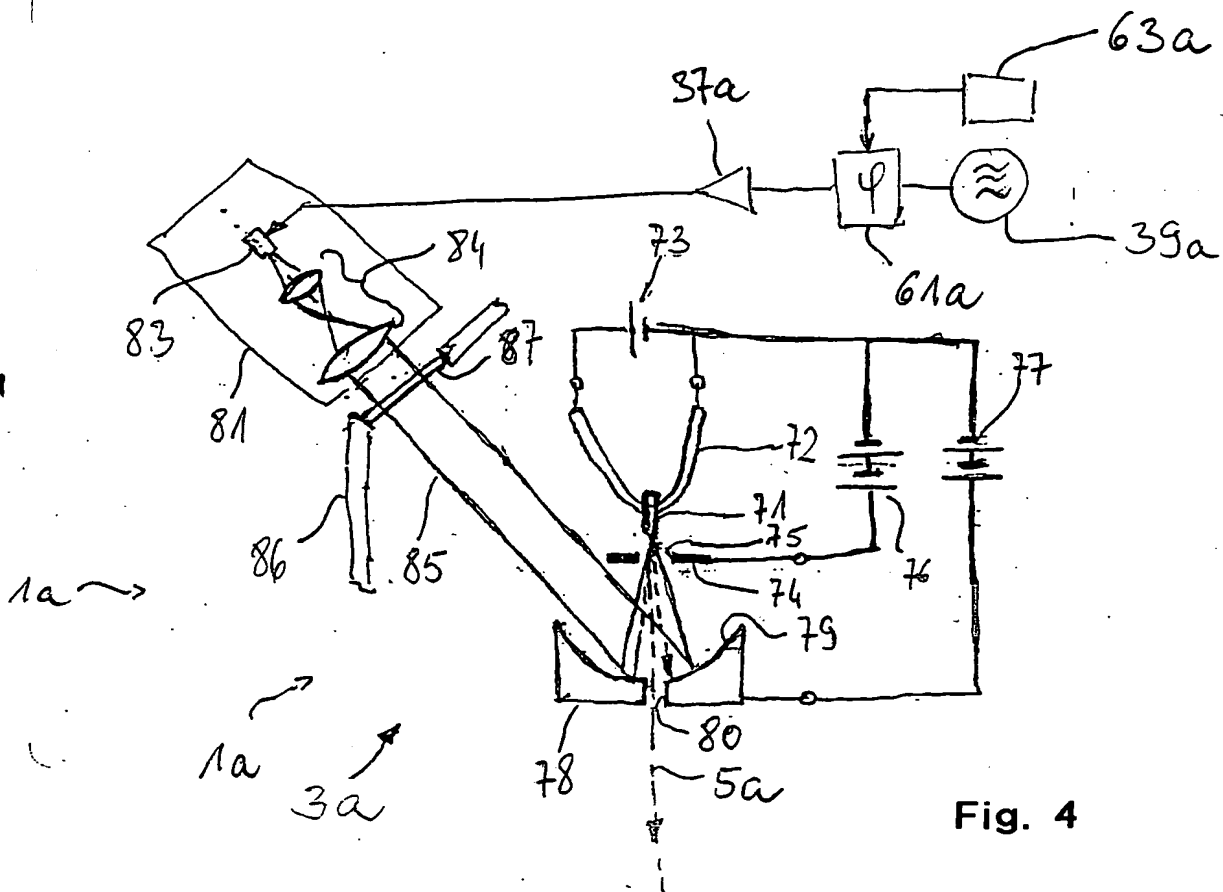


Fig. 4

die geladenen Teilchen des Pulses verzögert werden, und dass eine Stärke der Hauptkomponente des elektrischen Feldes zeitlich abnimmt.

5 30. Fokussiersystem nach einem der Ansprüche 27 bis 29,
ferner umfassend eine Steuerung (99) zur Einstellung
einer Phasenbeziehung zwischen der gepulsten Quelle
(3g) und dem Hochfrequenzgenerator derart, dass die
10 Hauptkomponente des elektrischen Feldes bei Eintritt
eines Pulses geladener Teilchen derart orientiert ist,
dass die geladenen Teilchen des Pulses beschleunigt
werden, und wobei eine Stärke der Hauptkomponente des
elektrischen Feldes ausgehend von einem Zentrum des
von dem gepulsten Strahl durchsetzten Inneren nach
15 radial Außen zunimmt.

31. Fokussiersystem nach einem der Ansprüche 27 bis 29,
ferner umfassend eine Steuerung (99) zur Einstellung
einer Phasenbeziehung zwischen der gepulsten Quelle
20 (3g) und dem Hochfrequenzgenerator derart, dass die
Hauptkomponente des elektrischen Feldes bei Eintritt
eines Pulses geladener Teilchen derart orientiert ist,
dass die geladenen Teilchen des Pulses verzögert
werden, und wobei eine Stärke der Hauptkomponente des
elektrischen Feldes ausgehend von einem Zentrum des
von dem gepulsten Strahl durchsetzten Inneren nach
radial Außen abnimmt.

32. Elektronenmikroskopiesystem zur Untersuchung einer in
30 einer Objektebene (9g) des Elektronenmikroskopie-
systems (1g) anordenbaren Probe (11g), insbesondere
nach einem der Ansprüche 1 bis 25, umfassend:

ein Elektronendetektionssystem (17g) zur Detektion von von der Objektebene (9g) ausgehenden Sekundärelektronen und

5 ein Fokussiersystem (7g,95) nach einem der Ansprüche 26 bis 31, wobei die gepulste Quelle eine Elektronenquelle (3g) zur Bereitstellung eines gepulsten Elektronenstrahls (6g) ist und die Fokussierlinseanordnung (7g,95) ein Elektronenmikroskopieobjektiv (7g)
10 umfasst.

33. Elektronenmikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 1 bis 25 oder 32, wobei das Elektronenmikroskopieobjektiv (7g) eine Fokussierlinse (19, 21) zur
15 Fokussierung des Primärelektronenstrahls in der Objektebene (9) aufweist.

34. Elektronenmikroskopiesystem nach Anspruch 33, wobei das Elektronenmikroskopieobjektiv (7g) eine Ablenk-
20 einrichtung (27) zur Änderung eines Ortes (47) in der Objektebene (3) aufweist, auf welchen der fokussierte Primärelektronenstrahl gerichtet ist.

35. Elektronenmikroskopiesystem nach einem der Ansprüche 1 bis 25 oder 32 bis 34, wobei das Elektronenmikroskopieobjektiv wenigstens ein Elektrodenpaar
25 (23,25) umfasst, welches dazu ausgebildet ist, die von der Proben ausgehenden Elektronen zu beschleunigen.

30 36. Verfahren zum elektronenmikroskopischen Gewinnen von Strukturinformation einer Probe, umfassend:

Anordnen einer Oberfläche der Probe in einem Bereich um eine Objektebene einer Objektivlinse eines Elektronenmikroskopiesystems,
35

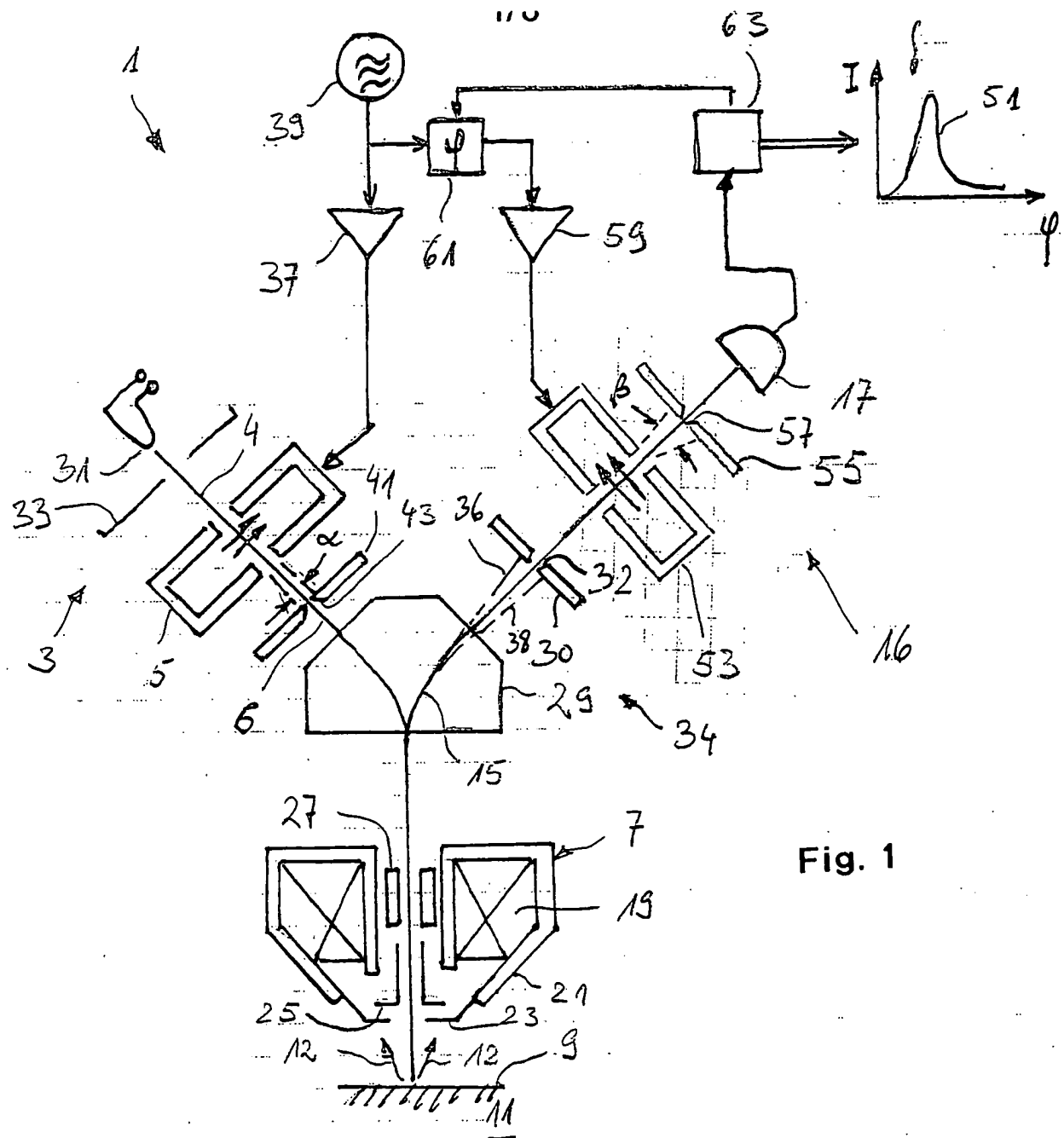


Fig. 1

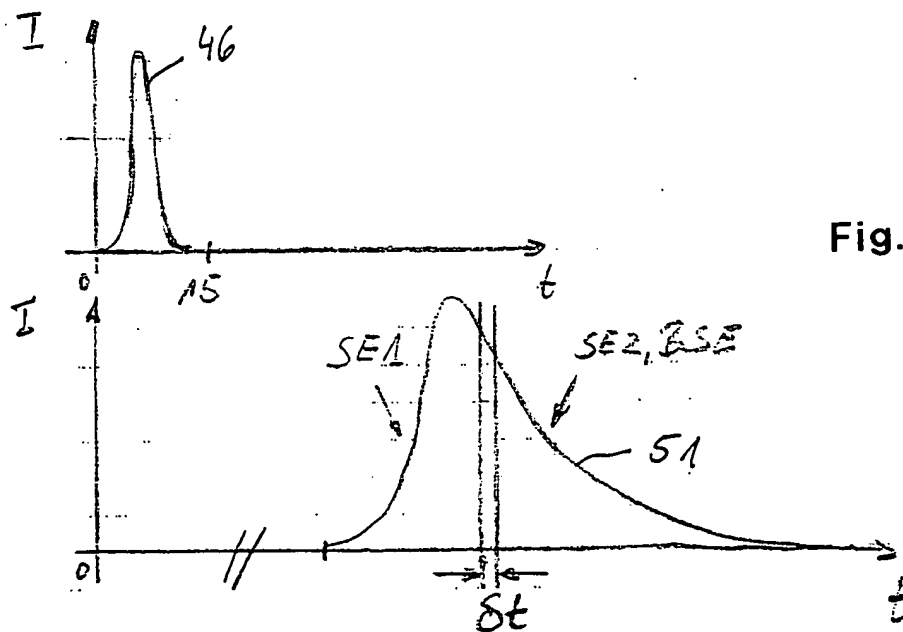


Fig. 2

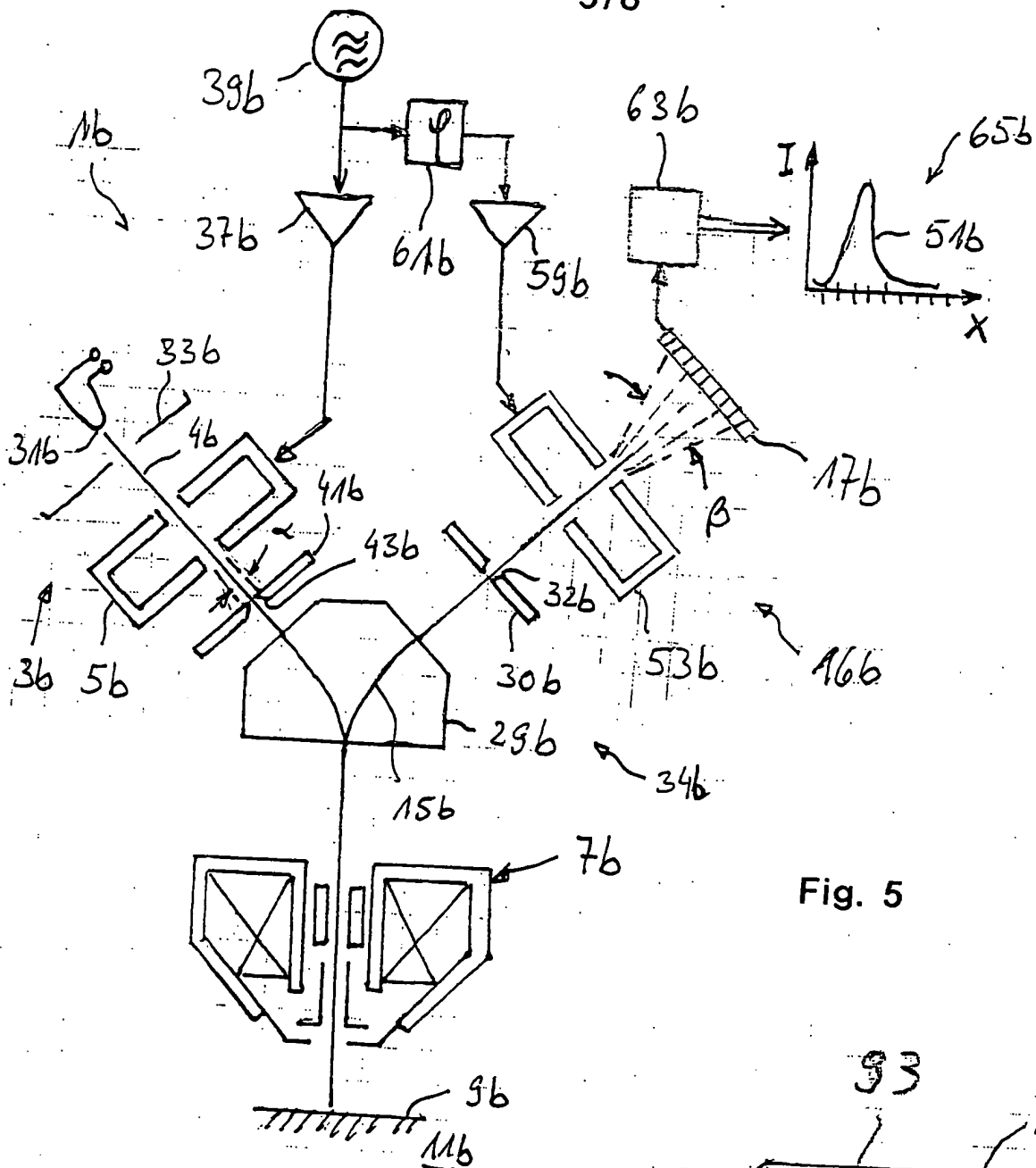


Fig. 5

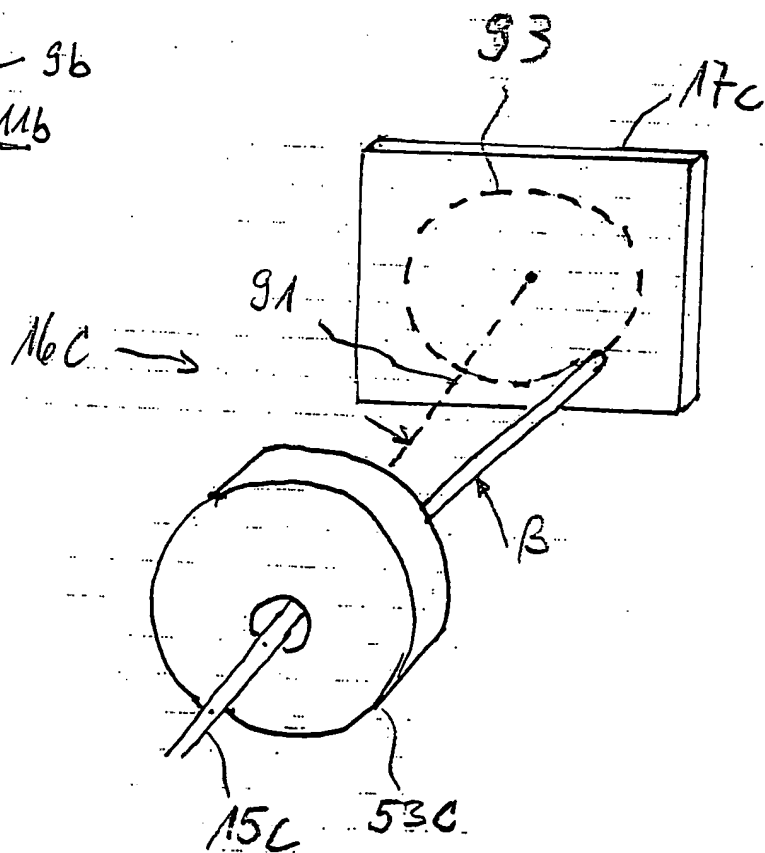


Fig. 6

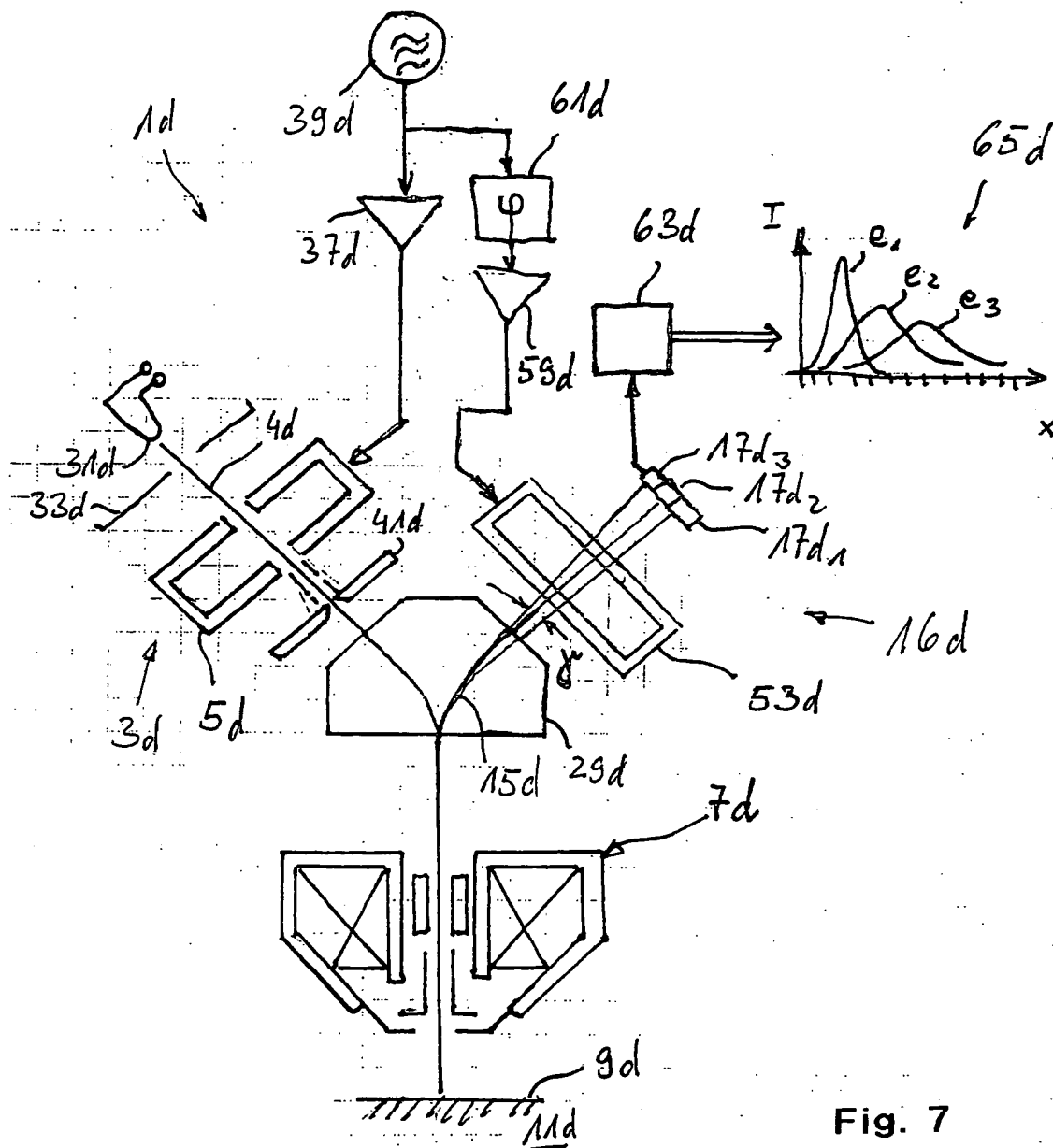


Fig. 7

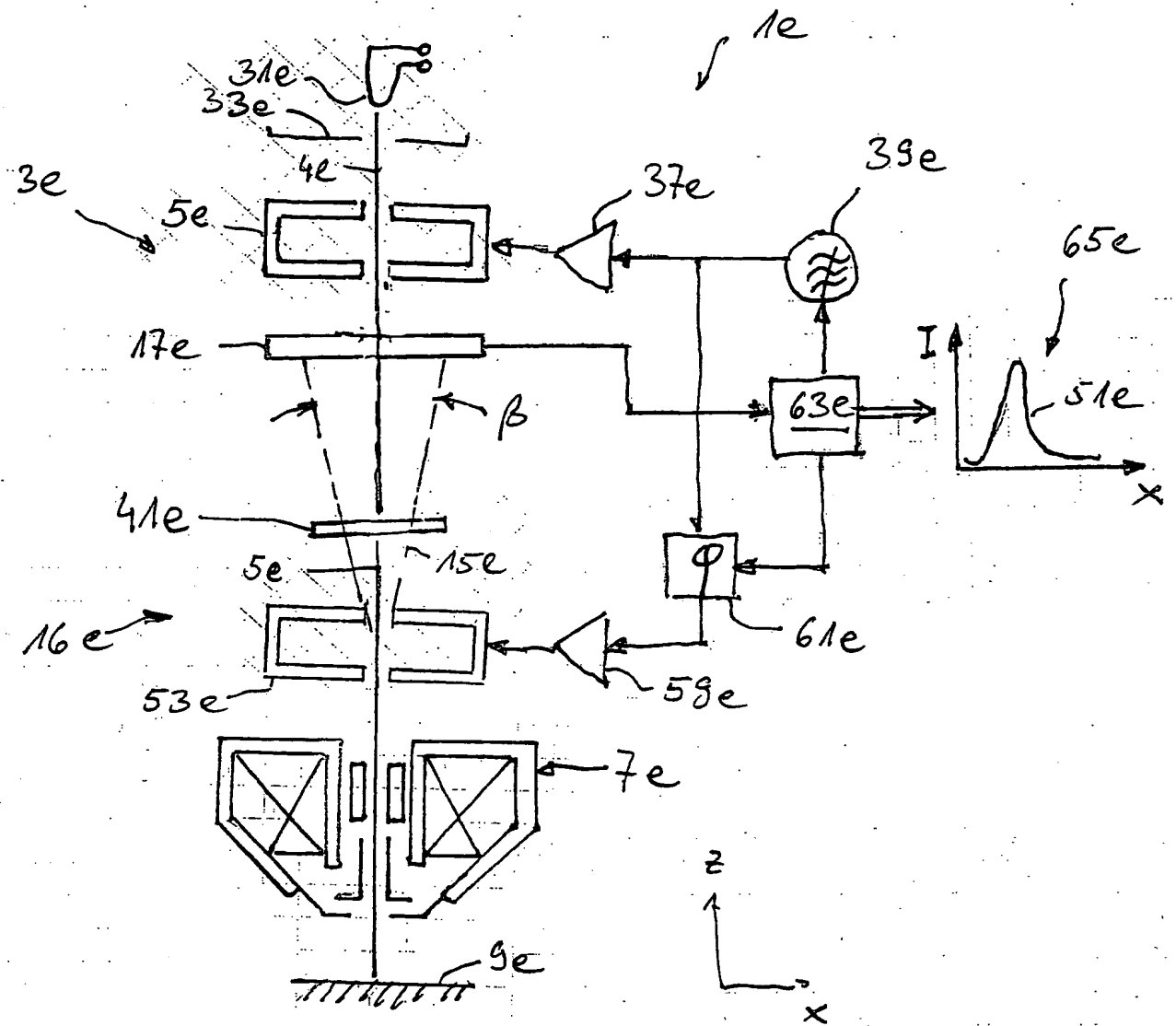


Fig. 8

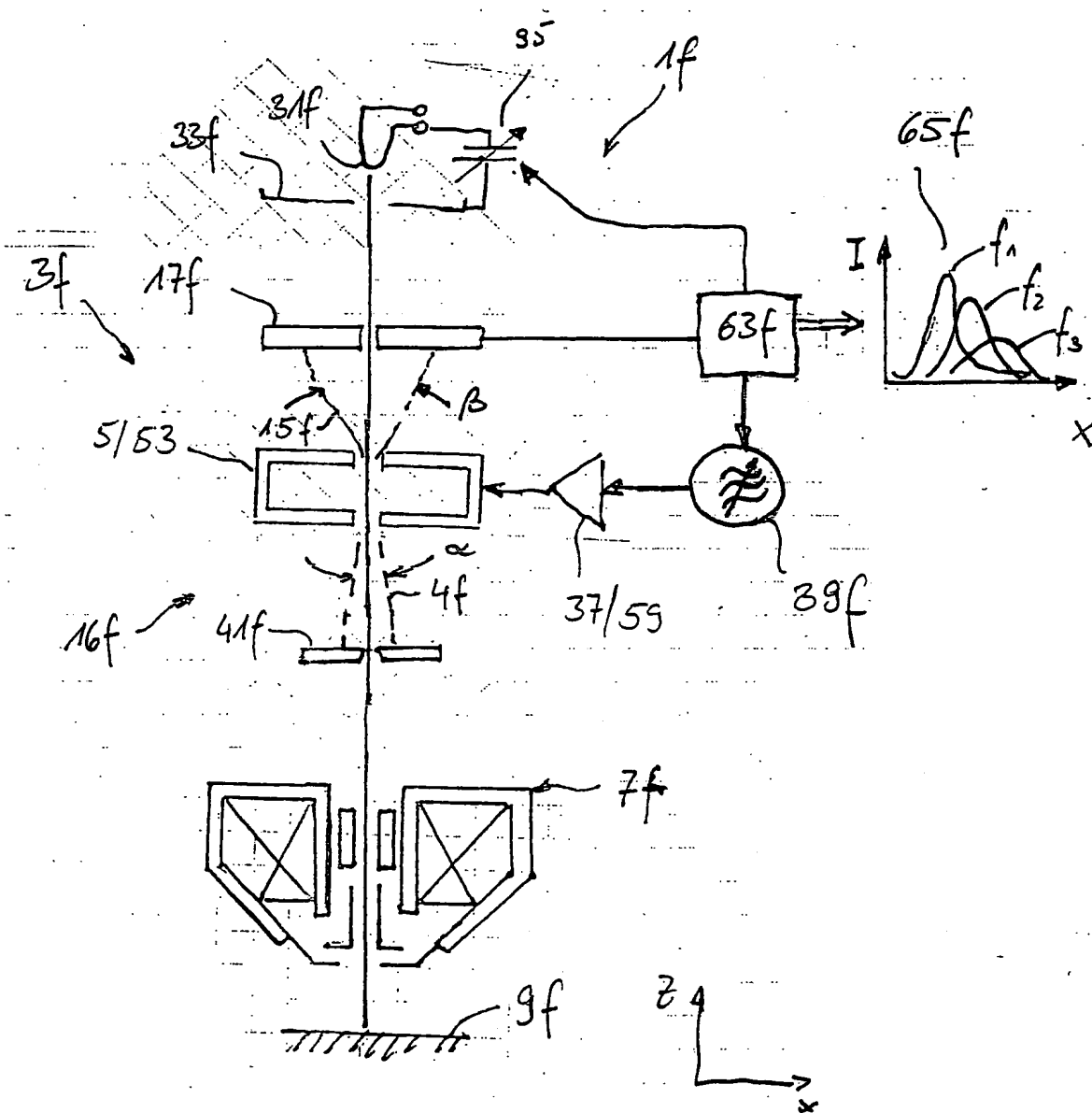


Fig. 9

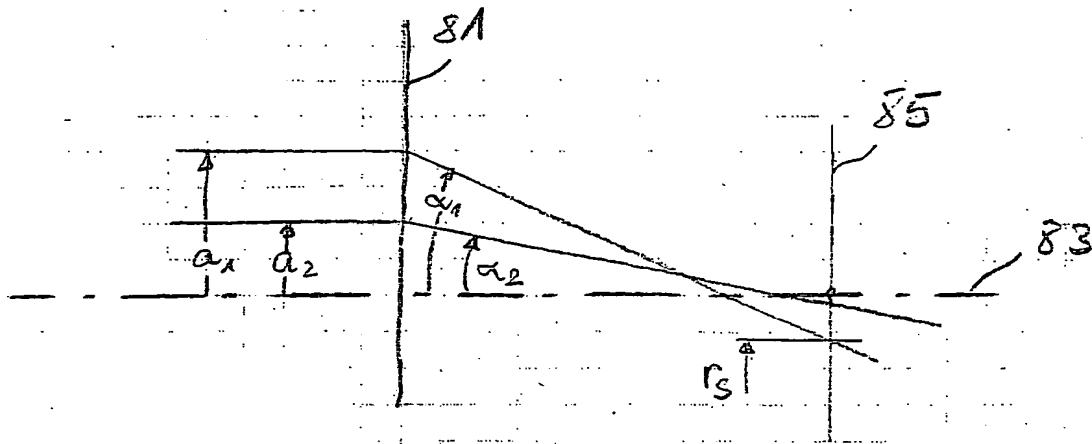


Fig. 10a

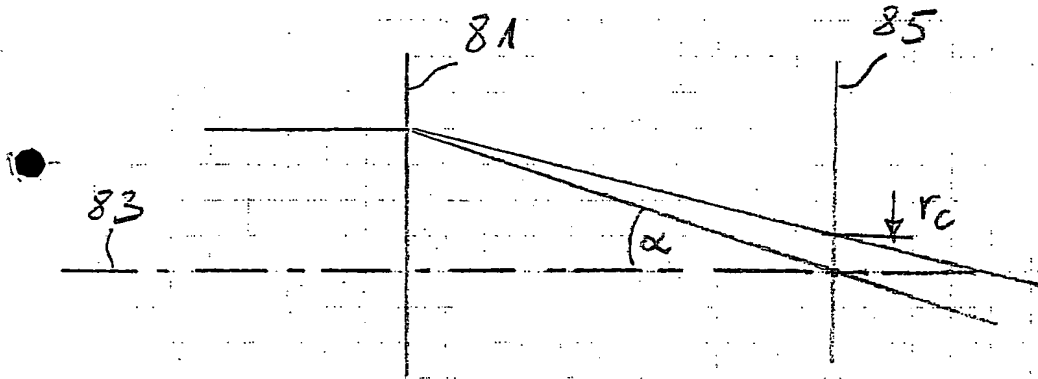


Fig. 10b

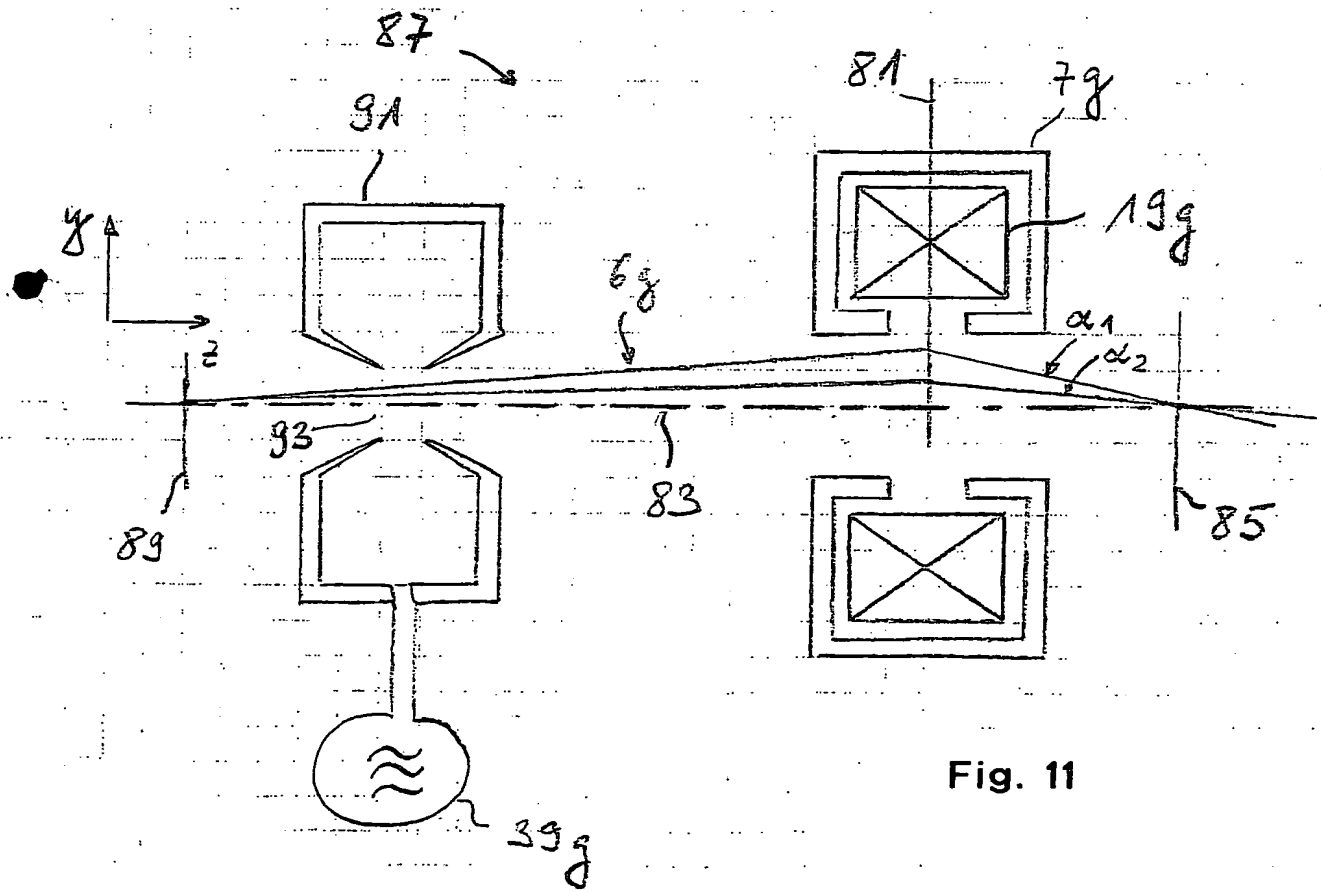


Fig. 11

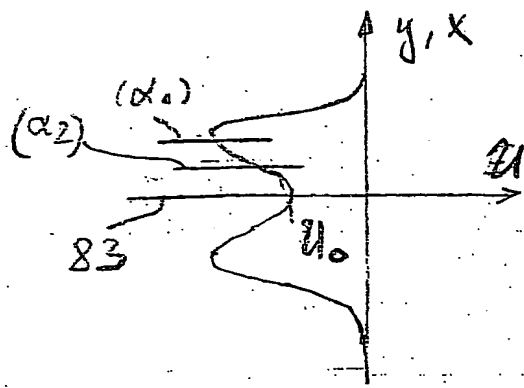


Fig. 12

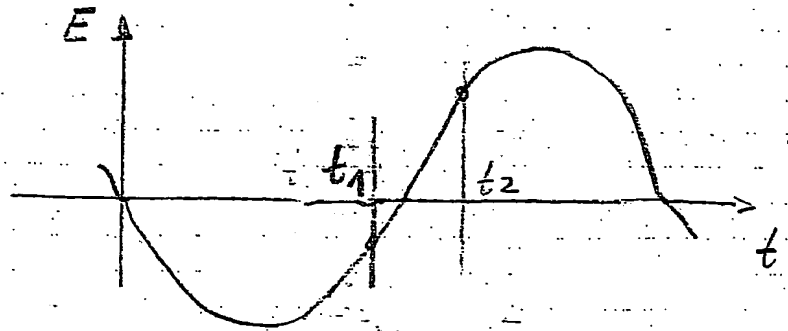


Fig. 13

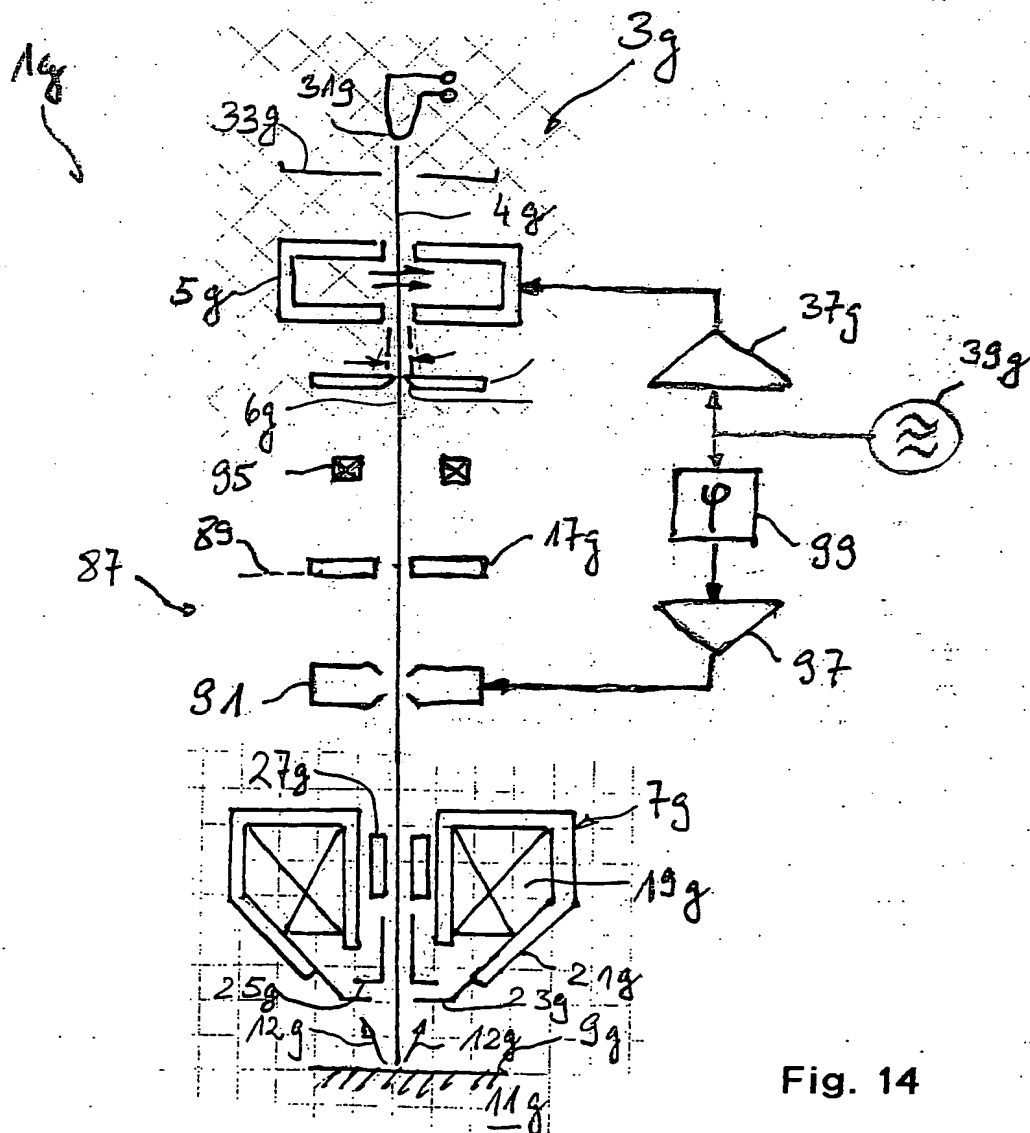


Fig. 14

Zusammenfassung

5

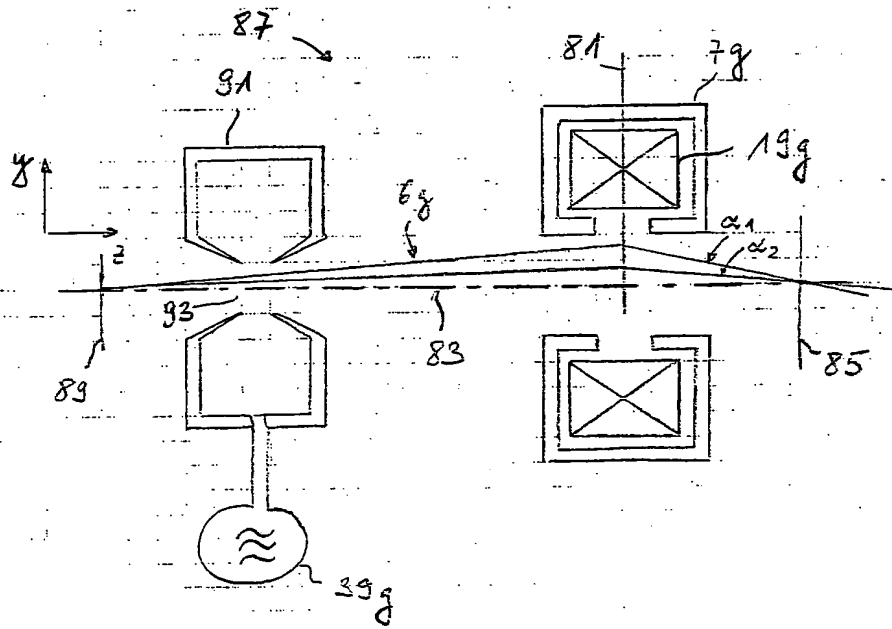
10

15

Zur Detektion von Zeitabhängigkeiten von durch Primärelektronen erzeugten sekundären Elektronen wird ein Elektronenmikroskopiesystem und ein Elektronenmikroskopieverfahren vorgeschlagen, bei dem Primärelektronenpulse auf eine Probenoberfläche gerichtet werden und von der Probenoberfläche ausgehende Elektronen zeitaufgelöst detektiert werden. Hierzu umfasst das System insbesondere einen Hohlraumresonator (5g). Ein Hohlraumresonator (91) kann auch dazu eingesetzt werden, Fehler von Fokussierlinsen zu reduzieren.

(Figur 11)

**Zeichnung zur Zusammenfassung
(Figur 11)**



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☒ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.